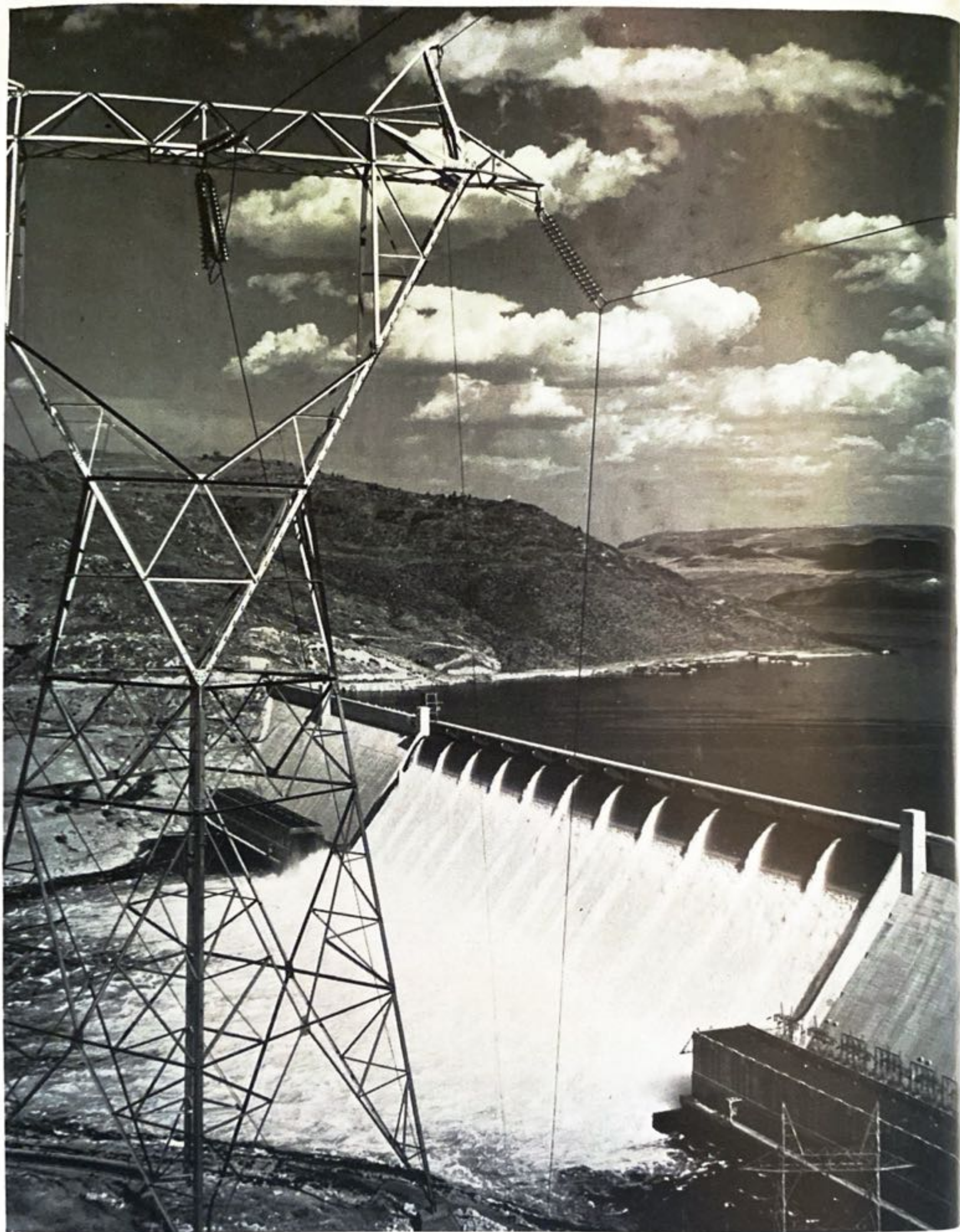
L. CH. G. van den BERG

HET JONGENS ELECTRICITEIT-BOEK



HET JONGENSELECTRICITEITSBOEK



De Grand Coulee Dam in de Verenigde Staten.

★

PRINTED IN HOLLAND BY MOUTON & CO.
THE HAGUE

★

VOORWOORD

De toepassingen der electriciteit hebben tegenwoordig zo'n invloed op ons dagelijks leven, dat het wenselijk is, dat elke jongen van de inhoud van dit boek kennis neemt. Het behoort tot de algemene ontwikkeling van de toekomstige generatie een idee te hebben hoe en waarom een electrische trein rijdt, waar onze electrische energie vandaan komt en welke problemen zich bij de overbrenging voordoen en nog zoveel andere toepassingen waar wij dagelijks mee in aanraking komen.

Het doel van dit boek is de moderne toepassingen van de electriciteit op populaire wijze te beschrijven en daarbij zoveel mogelijk op de voor jongens interessante details der verschillende takken van de electrotechniek in te gaan. Het kan daarbij van nut zijn een juist begrip te hebben van enige grondbeginselen, die dan ook naar voren worden gebracht, al vormen zij soms voor een deel een herhaling van wat in deel I van Het Jongenselectriciteitsboek werd behandeld. Dit geldt in hoofdzaak voor het eerste hoofdstuk, dat deze grondbeginselen behandelt. Wie dit hoofdstuk dan ook goed heeft begrepen zal daarvan veel gemak ondervinden bij het lezen van de volgende hoofdstukken.

Het is logisch te beginnen met de productie en de verdeling van de electrische energie. Al spoedig echter moet de lezer zich vertrouwd maken met de belangrijkste electrische meetinstrumenten, daar deze steeds weer voorkomen in de techniek waarin het meeste gemeten wordt: de electrotechniek. Vandaar dat reeds het vierde hoofdstuk deze meetinstrumenten behandelt, daarbij alle instrumenten, die niet van groot belang zijn, weglatend.

In betrekkelijk willekeurige volgorde behandelen de volgende hoofdstukken verschillende onderwerpen, die in de electrotechniek een aparte plaats innemen. Het zal duidelijk zijn, dat in een boek

L. Ch. G. van den Berg

HET JONGENS-ELECTRICITEITSBOEK

Deel II



DE BEZIGE BIJ · AMSTERDAM
1950

INHOUDSOVERZICHT

als dit een zekere beperking bij de behandeling der onderwerpen nodig was. Zo zou er b.v. naar verhouding over telefoon en telegraaf veel meer te vertellen zijn. Getracht is echter niet in te ingewikkelde details te treden.

Met uitzondering van het eerste hoofdstuk, dat de theorie der electriciteit behandelt is dit boek in een verhalende trant geschreven, zodat de lezer weinig inspanning nodig zal hebben bij zijn kennismaking met de verschillende onderwerpen. Hij zal daarbij het antwoord vinden op vele vragen, die hij zich als belangstellende in de electrotechniek waarschijnlijk vaak gesteld heeft. Ongemerkt verrijkt hij bij het lezen dan ook zijn kennis van een der belangrijkste technieken van onze twintigste eeuw.

L. Ch. G. van den Berg

de weerstand niet gauw door temperatuur- of andere invloeden zal veranderen.

Ook het ijken van ampèremeters geschiedt door deze te vergelijken met precisie-instrumenten; maar uiteindelijk is men uitgegaan van de besproken technische definitie.

Voor het ijken van voltmeters kan men natuurlijk gebruik maken van precisie-voltmeters, maar met behulp van sommige schakelingen zijn ze te vergelijken met normaal-elementen, dat zijn elementen, die een door de fabriek nauwkeurig aangegeven spanning leveren.

De eenheid van spanning, de volt, is dan gedefinieerd door: Een volt is de spanning, die tussen de uiteinden van een geleider met een weerstand van één ohm moet worden aangelegd, wil men in die geleider juist één ampère stroomsterkte krijgen.

b. Verscheidene spanningen, stromen en weerstanden in een netwerk.

In deel I van *Het Jongenselectriciteitsboek* is reeds besproken wat er gebeurt wanneer verscheidene weerstanden in serie en parallel worden geschakeld. Wij kunnen hier dus kort zijn en slechts enige belangrijke punten naar voren brengen.

Wanneer twee weerstanden in serie worden geschakeld, dan is de totale weerstand van het netwerk gelijk aan de som van de oorspronkelijke (deel)weerstanden. Dit geldt ook voor meer dan twee weerstanden.

Schakelt men weerstanden parallel, dan geldt in het algemeen dat:

$$\frac{1}{R_v} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \ldots \qquad (2)$$

Bij parallelschakeling van slechts twee weerstanden geldt deze formule natuurlijk ook wel, maar het is gemakkelijker te werken met:

$$R_v = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \qquad (3)$$

omdat deze vorm je direct de waarde van R_v geeft en niet de om-

dan ook de lading*verplaatsing* per seconde. De eenheid van lading is de coulomb en wanneer per seconde één coulomb door een geleider vloeit, zegt men dat de stroomsterkte één Ampère (eenheid) bedraagt.

Practisch is deze definitie niet, omdat het niet meevalt aan de hand ervan een stroommeter te ijken! Voor het ijken van meetinstrumenten heeft men daarom een andere, deugdelijker, definitie van de stroomsterkte-eenheid gekozen. Door berekening heeft men nauwkeurig kunnen afleiden, dat een bepaalde hoeveelheid zilver neer moet slaan — op de negatieve electrode — wanneer een electrische stroom door een zilvernitraat-oplossing vloeit. Een stroom, die constant is en in één seconde 1,118 milligram zilver neerslaat, heeft een sterkte van 1 Ampère (1 A). Met behulp van deze technische definitie is men in staat ampèremeters te ijken.

Een electrische stroom ontstaat niet zo maar in een geleider. Daartoe is een verschil in electrische spanning of potentiaal tussen twee punten nodig. De potentiaal van een geleider is groter naarmate de lading groter is. Hoe groter het potentiaalverschil tussen twee punten in een geleider, hoe groter de daardoor veroorzaakte electrische stroom zal zijn. Daarom is het bepalen van dit potentiaalverschil van groot belang, terwijl men er ook een eenheid voor moet hebben. Voor het ijken van spanningsmeters heeft men geen technische definitie opgesteld, daar het ijken meestal gaat door de spanning af te leiden uit de stroom en de weerstand met behulp van de bekende wet van Ohm:

$$V = R.I \qquad (1)$$

De eenheid van weerstand, de ohm, is de weerstand, die een kwikzuil heeft bij nul graden Celsius, wanneer hij 1,063 meter lang is en een massa heeft van 14,452 gram. De doorsnede moet daarbij over de hele lengte van de zuil gelijkmatig zijn en de vereiste lengte en massa leveren ongeveer een doorsnede van 1 mm^2 op. Ook deze definitie, die dus vreemd aandoet, is afgeleid uit de theoretische.

Nu moet je niet denken, dat weerstanden geijkt worden met een bovenomschreven zuil van kwik! Voor de ijking beschikt men over zgn. normaalweerstanden, dat zijn weerstanden die nauwkeurig geijkt zijn en waarvan de constructie zodanig is, dat de waarde van

HOOFDSTUK I

Practische theorie der electriciteit: De eenheden in de electriciteit - weerstand - capaciteit - zelfinductie - wederzijdse inductie - krachten op geleiders in magnetische velden - wisselstroomverschijnselen - eenheden en eigenschappen van wisselstromen.

a. De eenheden in de electriciteit.

Om een beetje wegwijs te raken in de electrotechniek is het van groot belang kennis te hebben van enige grondbegrippen met de daarbij behorende eenheden. Deze grondbegrippen zullen wij eerst in het kort behandelen.

De electrotechniek is de techniek der electrische stromen en het is dus vanzelfsprekend, dat we allereerst even stilstaan bij het begrip electrische stroom en de eenheid, waarin wij deze stroom dienen te meten. We nemen aan, dat je weet, dat er twee soorten ladingen bestaan, positieve en negatieve, en dat deze ladingen steeds erop uit zijn elkaar te neutraliseren. Heeft een geleider een positieve lading, hetgeen neerkomt op een tekort aan negatieve electronen en heeft een andere geleider in de buurt een negatieve lading, dus een teveel aan electronen, dan zal de neiging bestaan het aantal electronen zodanig over beide geleiders te verdelen, dat geen van beide meer een tekort of een teveel heeft. Dit zal niet zonder meer mogelijk zijn, daar ladingen zich niet in alle stoffen kunnen verplaatsen, althans niet even gemakkelijk. Er zal in zo'n geval een verbinding tussen de geleiders moeten bestaan, die ladingverplaatsingen gemakkelijk toelaat en deze verbinding zal men dan eveneens een geleider kunnen noemen.

Verbindt men beide bovengenoemde geleiders met een derde geleider, dan vereffent zich het lading*verschil,* waarbij zich in hoofdzaak electronen van de negatieve geleider naar de positieve verplaatsen. Wij zeggen dan dat er een electrische stroom vloeit, zodat een electrische stroom niets anders is dan een *ladingverplaatsing*. Volgens afspraak vloeit de stroom van het punt met positievere lading naar dat met meer negatieve lading („van + naar —").

Het is duidelijk, dat de stroom groter is naarmate er zich in de geleider per seconde meer lading verplaatst. De stroom*sterkte* is

een keten al draaiende de e.m.k.'s te tellen (let op + en —) totdat je terug bent in het punt van uitgang. Dan doe je wéér hetzelfde, maar telt nu de spanningsvallen (ook letten op + en —) over de weerstanden.

Het aardige van deze regeltjes is, dat je van tevoren niet hoeft te weten hoe de stromen nu lopen. Je neemt maar een richting aan. Heb je deze richting verkeerd gekozen, dan zal dat bij het antwoord wel blijken, dat dan negatief is. In fig. 4 hebben we opzettelijk I_1 rechtsom draaiend gekozen, al kun je van tevoren wel vermoeden, dat hij linksom draait in verband met de polariteit van de stroombron V_1. Stroom I_3 hebben we daarom maar naar links gericht, anders zouden er in knooppunt P alleen maar stromen aankomen, hetgeen moeilijk zal gaan!

Het vinden van de gevraagde stroom is nu nog maar een rekensommetje, als je de wetten van Kirchoff maar goed toepast:

$$I_3 = I_1 + I_2 \text{ (Wet 1 van Kirchoff voor punt P).} \qquad (7)$$

Keten A (rechtsom draaiend, beginnend bij Q):

$$-V_1 = R_1.I_1 + R_3.I_3 \qquad (8)$$

(denk erom, dat je een weerstand altijd vermenigvuldigt met de *bijbehorende* stroom, dus R_1 met I_1, maar R_3 met I_3)
Keten B (rechtsom draaiend, beginnend bij Q):

$$-V_2 = -R_3.I_3 - R_4.I_2 - R_2.I_2 \qquad (9)$$

We hebben nu de vergelijkingen, die we nodig hebben en kunnen de gegeven waarden invullen in (8) en (9), terwijl wij voor I_3 overal waar deze voorkomt invullen $(I_1 + I_2)$, wat we in (7) al gevonden hebben. Dit levert op:

$$-26 = 4\,I_1 + 6\,I_1 + 6\,I_2 \qquad (10)$$

en

$$-42 = -6\,I_1 - 6\,I_2 - 2\,I_2 - 10\,I_2 \qquad (11)$$

Vereenvoudigen wij (10) en (11), dan krijgen we:

$$-26 = 10\,I_1 + 6\,I_2 \qquad (12)$$

en

$$-42 = -6\,I_1 - 18\,I_2 \qquad (13)$$

De oplossing van deze twee kleine vergelijkingen is gemakkelijk: uit (13) los je I_1 op: $6\,I_1 = 42 - 18\,I_2$, zodat $I_1 = 7 - 3\,I_2$ en

$$V_1 : V_2 : V_3 = R_1 : R_2 : R_3 \qquad (6)$$

Al deze formules zijn gemakkelijk af te leiden uit de wet van Ohm. Er zijn echter gevallen waarbij je de wet van Ohm niet mag toepassen. Dat is wanneer je een netwerk hebt met meer dan één keten, terwijl in verschillende ketens een e.m.k. voorkomt. Een dergelijk eenvoudig geval is in fig. 4 getekend. Het netwerk bevat twee ketens A en B, terwijl in beide ketens een spanningsbron voorkomt, V_1 en V_2. In de gemeenschappelijke tak, die een weerstand R_3 heeft is een stroommeter M opgenomen, en nu is de vraag: hoe groot is de stroom en hoe vloeit hij, van links naar rechts, of omgekeerd?

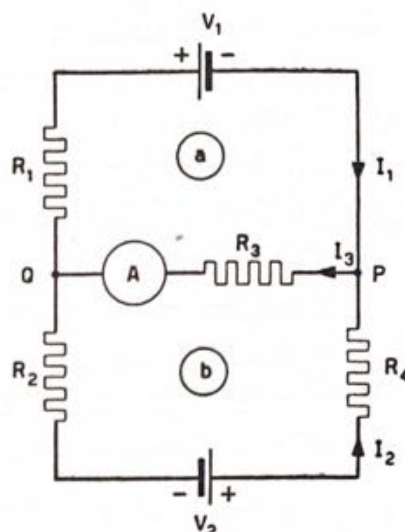


Fig. 4

Ter bepaling van de gevraagde stroom pas je de wetten van Kirchoff toe.

Wet 1: In een knooppunt van stromen (dus van geleiders) is de som van alle afgaande stromen gelijk aan de som van alle aankomende stromen.

Wet 2: In één keten van het netwerk is de som van de e.m.k.'s gelijk aan de som van de spanningsvallen over de weerstanden. Daarbij moeten de e.m.k.'s positief gerekend worden wanneer bij het passeren van de spanningsbron van — naar + wordt gegaan; de spanningsvallen moeten positief worden gerekend, wanneer men (al draaiende in de keten) mèt de stroom meegaat.

De eerste wet is logisch, want wanneer de som van de in het knooppunt aankomende stromen groter was dan de afgaande stromen samen, dan zou zich in dat knooppunt lading ophopen. Er ontstond dan in dat knooppunt een hoe langer hoe meer stijgende potentiaal en die zou de afgaande stromen wel verhogen, òf wel de aankomende stromen verkleinen!

De tweede wet is ook niet zo moeilijk: je begint in een punt van

gekeerde waarde, zoals formule (2). Denk erom, dat deze formule alleen geldt voor twee weerstanden parallel, hetgeen echter nogal eens voorkomt.

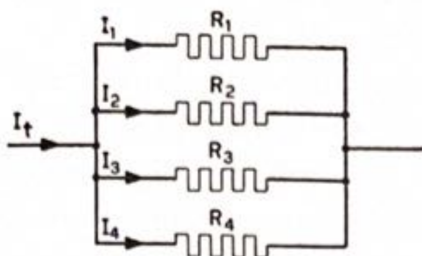


Fig. 1

Wanneer enige weerstanden parallel zijn geschakeld (in fig. 1 zijn het er vier), en een stroom I_t (totale stroom) verdeelt zich in de vier takken, dan kun je de deelstromen I_1 t/m I_4 gemakkelijk berekenen met het regeltje:

$$I_1 : I_2 : I_3 : I_4 = \frac{1}{R_1} : \frac{1}{R_2} : \frac{1}{R_3} : \frac{1}{R_4} \qquad (4)$$

De stromen in de takken verhouden zich dus als de omgekeerde waarden van de weerstanden der takken.

Ook hier is het makkelijk als je een iets andere uitdrukking hebt voor het geval een stroom I_t zich verdeelt in slechts twee takken, omdat dat in de practijk meestal voorkomt. In dat geval is:

$$I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot I_t$$

en $$I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot I_t \qquad (5)$$

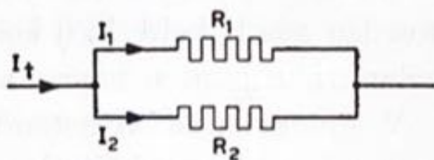


Fig. 2

waardoor je de deelstromen direct uitgedrukt vindt in de totale stroom. Een deelstroom is dus gelijk aan *„de andere weerstand gedeeld door de som der twee weerstanden, maal de totale stroom".*

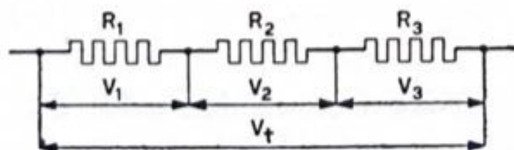


Fig. 3

In fig. 3 zijn drie weerstanden in serie geschakeld en aangesloten op een spanning V_t. Vaak wordt gevraagd hoe groot de deelspanningen zijn over de weerstanden, m.a.w. hoe de spanning V_t zich over de weerstanden verdeelt. Dit is al heel gemakkelijk te berekenen, daar de spanningsvallen over de weerstanden evenredig zijn aan de weerstanden, hetgeen direct uit de wet van Ohm volgt:

Boven: Motorgeneratoren voor het laden van accumulatorenbatterij.

Onder: Accumulatorenbatterij in speciaal daarvoor aangelegde kelder.

(foto's van Prov. El. Bedrijf N. Holland).

Daarbij blijft de spanning over elke condensator natuurlijk gelijk, daar het de spanning is tussen de punten P en Q. De ladingen der condensatoren zijn echter niet gelijk.

Heb je nl. een condensator met een capaciteit C en geef je die een lading Q, dan krijgt hij daardoor een potentiaalverschil tussen zijn electroden V. Maak je Q nu tweemaal zo groot, dan blijkt dat V ook tweemaal zo groot wordt. V is dus evenredig aan Q, zodat we kunnen schrijven Q = een constante maal V. Deze constante nu noemen we de capaciteit van de condensator en geven wij aan met de letter C. In het algemeen geldt dus $Q = C.V$.

Is in fig. 5 dus voor alle condensatoren de spanning V gelijk, dan is $V_1 = V_2 = V_3 = V_4$. Vervangen we telkens V door de overeenkomstige waarde van Q/C, dan is dus:

$$\frac{Q_1}{C_1} = \frac{Q_2}{C_2} = \frac{Q_3}{C_3} = \frac{Q_4}{C_4}$$

en je ziet, dat de ladingen van de condensatoren zich verhouden als de capaciteiten. Inderdaad zul je bij een grotere capaciteit een evenredig grotere lading in de condensator moeten brengen, wil je de spanning gelijk houden.

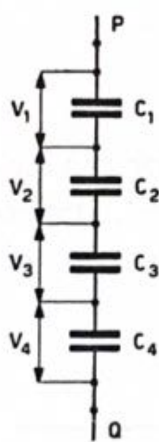


Fig. 6

Hebben wij condensatoren in serie geschakeld, dan zal over elke condensator een bepaalde spanning staan. Fig. 6 geeft 4 condensatoren in serie, waarover de spanningen V_1, V_2, V_3 en V_4 staan. Samen geven deze spanningen natuurlijk de totale spanning V_{PQ}. De condensatoren hebben echter wel alle gelijke lading. Zou dit niet het geval zijn, dan zou er een ladingverschuiving plaats vinden, die de lading gelijkmatig over de vier condensatoren zou verdelen.

We weten dus wel, dat $Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_4$, terwijl ook $V_1 + V_2 + V_3 + V_4 = V_{PQ}$. Schrijven we nu telkens voor V : Q/C, dan is dus:

$$\frac{Q_1}{C_1} + \frac{Q_2}{C_2} = \frac{Q_3}{C_3} + \frac{Q_4}{C_4} = V_{PQ} = \frac{Q_{PQ}}{C_{PQ}}$$

waarbij C_{PQ} weer een denkbeeldige condensator is, die tussen P en Q geschakeld zou moeten worden om de serieschakeling juist te

deze gevonden „waarde" voor I_1 vul je maar in de andere vergelijking (12) in:

$$-26 = 70 - 30\ I_2 + 6\ I_2$$
$$24\ I_2 = 96$$
$$I_2 = 4 \text{ Ampère.}$$

Dit vul je weer in (13) en je vindt:

$$6\ I_1 = 42 - 18 \times 4$$
$$I_1 = 7 - 12 = -5 \text{ Ampère.}$$

Het negatieve antwoord voor I_1 betekent dat de stroom van 5 A in tegengestelde richting vloeit aan die, welke je in de figuur hebt aangenomen. Het gaat er nu om I_3 te vinden, want alleen die is gevraagd. Nu moet je consequent zijn en vasthouden aan vergelijking (7). Daarbij moet je voor I_1 de werkelijk gevonden waarde invullen, dus -5 en niet $+5$. Het blijkt dan dat $I_3 = -5 + 4 = -1$ A, zodat I_3 1 A groot is, maar tegengesteld gericht is aan de in fig. 4 getekende richting.

We hebben nu dit voorbeeld van de wetten van Kirchoff uitvoerig behandeld, omdat het vaak een gemakkelijke oplossing geeft voor vele vraagstukjes, die met andere methoden òf heel lastig òf helemaal niet zijn op te lossen.

Capaciteit.

Wanneer je twee geleiders hebt, die gescheiden zijn door een isolator, dan vormen deze geleiders t.o.v. elkaar een capaciteit. Onderdelen, welke zo zijn geconstrueerd, dat zij een bepaalde capaciteit vertegenwoordigen noemt men condensatoren.

Schakel je enige condensatoren parallel (fig. 5), dan kan de gehele schakeling worden vervangen door een denkbeeldige condensator met een vervangcapaciteit $C_v = C_1 + C_2 + C_3 + C_4$. In het algemeen kun je dus, wanneer je condensatoren parallel schakelt, de capaciteiten ervan bij elkaar optellen om de totale capaciteit te vinden.

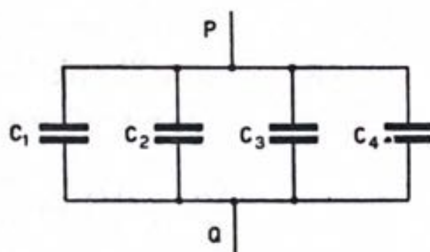


Fig. 5

richting van de stroom, dan wijst de duim de richting van de kracht aan, die de geleider zal ondervinden.

Hebben we nu een geleider in een magnetisch veld en bewegen wij dat in een richting loodrecht op de richting van de krachtlijnen, dan zal in die geleider een e.m.k. worden opgewekt. Ook deze eigenschap is van het grootste belang, omdat op dit principe de werking van onze dynamo's berust. In fig. 7 is een geleider getekend in een magnetisch veld. Het veld is van ons af gericht. We nemen aan, dat de geleider naar rechts wordt bewogen met een constante snelheid van v cm/sec. Er zal nu in de geleider een e.m.k. worden opgewekt, waarvan we eerst de richting willen bepalen. De e.m.k. moet zodanig gericht zijn, dat een eventuele stroom, die er het gevolg van zou zijn de beweging tracht tegen te werken. Stel, dat de e.m.k. naar beneden was gericht, dan zou bij kortsluiting van boven- en onderzijde van de geleider een stroom gaan lopen, die in de geleider van boven naar beneden gericht was (net als de e.m.k.). Volgens de zojuist besproken linkerhandregel zou daardoor een kracht opgewekt worden, die naar rechts zou zijn gericht. De geleider, die dus naar rechts beweegt zou alleen al door die kracht steeds naar rechts blijven bewegen en wij hadden een perpetuum mobile, hetgeen onmogelijk is. Inderdaad is de e.m.k. dan ook naar boven gericht en indien wij de uiteinden van de geleider zouden kortsluiten, zou de electrische stroom, die er het gevolg van zou zijn een tegenkracht K_t veroorzaken.

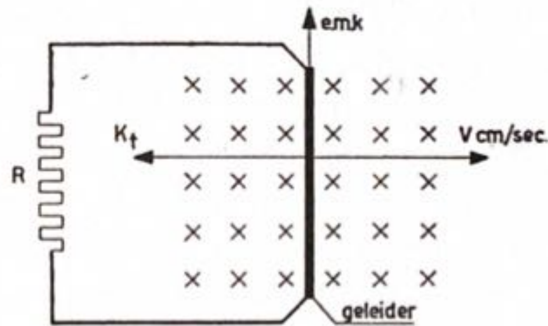


Fig. 7

Van groot belang is het ook te weten hoe groot nu de opgewekte e.m.k. is. Deze kunnen we als volgt vinden. We denken ons de uiteinden van de geleider verbonden met een weerstand R (zoals in fig. 7 ook is getekend). Het vermogen, dat opgewekt wordt in de geleider, doordat hij in beweging wordt gehouden gaat verloren in de weerstand in de vorm van warmte. Het is nu van belang dit vermogen te vinden. Vermogen is arbeid per tijdseenheid, terwijl

De richting van het veld, d.w.z. de richting van de kracht, die een magneetpool zou ondervinden, wanneer je haar in het veld bracht hangt dan af van de richting van de stroom en van de wikkeling. Heb je een constante stroom door de wikkeling gestuurd, dan krijg je een magnetisch veld met een constante sterkte, maar verandert de stroom in sterkte of richting, dan verandert het veld eveneens in sterkte of richting. Daaruit volgt, dat je een permanent magnetisch veld kunt opwekken, door een constante stroom door een wikkeling te sturen. Stuur je er echter een wisselstroom doorheen, dan krijg je ook een veld, dat van richting periodiek verandert en dat vaak een wisselveld wordt genoemd.

Hebben we een draadklos en plaatsen we daarbinnen een ijzeren kern, dan wordt de sterkte van het magnetisch veld groter. Men noemt dit verschijnsel inductie. Het getal dat aangeeft hoeveel malen de veldsterkte groter is geworden door het aanbrengen van het ijzer in de spoel, heet de permeabiliteit en wordt aangeduid met de letter μ.

Inductie.

Plaatsen we in een magnetisch veld een geleider en sturen we daardoor een electrische stroom, dan ondervindt de geleider een kracht, die zeer belangrijk is, omdat de werking van de electromotor op het optreden van deze kracht berust. Zo zal een rechte geleider, die zich in een magnetisch veld bevindt en daarbij loodrecht op de krachtlijnen van het veld gericht is, een kracht ondervinden :

$$K = 0{,}1\ B.I.l \qquad (14)$$

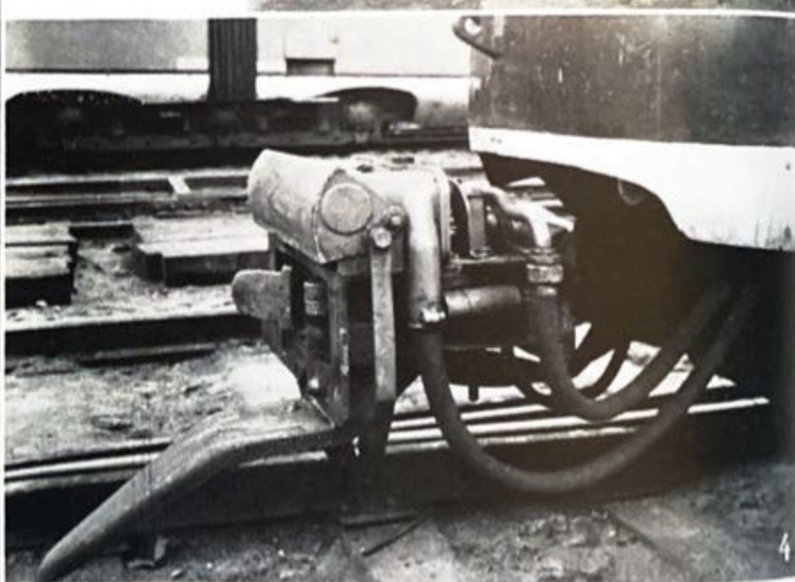
waarin K = de kracht
B = de veldsterkte
I = de stroom
l = de lengte van de geleider, voor zover hij zich in het veld bevindt.

De grootte van de kracht is dus uit (14) af te leiden, maar de richting is nog niet bepaald. Om deze vast te stellen maken we gebruik van de zgn. linkerhandregel: zorg, dat van je linkerhand de wijsvinger, de middelvinger en de duim loodrecht op elkaar staan. Wijst de wijsvinger in de richting van het veld en de middelvinger in de









1. Electrisch seinhuis op Amsterdam C.S. 2. Scharfenberg-koppeling van stroomlijntreinen; de stuurstroomnetten der beide treinstellen worden automatisch met elkaar doorverbonden, alsmede de luchtdrukleidingen voor de reminstallatie. 3. Stuurstand van een stroomlijntrein; links de schakelwals, in het midden de drie meters voor rijspanning, rijstroom en stuurspanning. 4. Scharfenberg-koppeling; bij ontkoppeld treinstel draait vóór de contacten van het stuurstroomnet een beschermklep (boven aan de koppeling).

(foto's N.S. Utrecht)

de afstand b dus afgelegd in b/v seconde. Na één seconde zal de breedte b dus gelijk zijn geworden aan v cm. De lengte van het vlakje dO blijft daarbij gelijk aan 1 cm. De verandering van het oppervlak dat buiten het veld komt te liggen *per tijdseenheid* is dus dO/dt.

Noemen we het totaal aantal krachtlijnen door de hele winding wanneer deze zich nog geheel in het veld bevindt Φ en het aantal krachtlijnen *per* cm^2 B (de veldsterkte van het veld), dan is dus Φ = B.O. en dΦ (de verandering van het totaal aantal krachtlijnen) = B.dO. De verandering van het totaal aantal krachtlijnen per seconde is dan dΦ/dt = B.dO/dt. Als we nog voor dO invullen l $\times$ v (dat was dO per *seconde*), dan is dus dΦ /dt = B.l.v.

In uitdrukking (15) hebben we al gezien, dat de geïnduceerde e.m.k. in een rechte geleider gelijk is aan 10^{-8} B.l.v volt, zodat we voor de winding kunnen schrijven:

$$e = 10^{-8}\ d\Phi/dt \text{ volt.} \qquad (16)$$

Dit geldt dus alleen zolang de winding bezig is het veld te verlaten. Beweegt de winding in een constant veld, dan wordt er geen e.m.k. opgewekt. Beweegt de winding zich geheel buiten het veld, dan wordt natuurlijk ook geen e.m.k. opgewekt. Je kunt zelf gemakkelijk nagaan, dat wanneer de winding bezig is in het veld te komen, in plaats van het te verlaten, dat een gelijke e.m.k. wordt opgewekt, die alleen tegengesteld gericht is aan de e.m.k. uit fig. 8.

De formule (16) geldt voor slechts één winding. In het algemeen bestaat een wikkeling echter uit verscheidene windingen welke als het ware in serie geschakeld zijn. Dat is om een hogere e.m.k. te verkrijgen. Je vindt die e.m.k. dan door het aantal windingen van de spoel (wikkeling) te vermenigvuldigen met de waarde van de e.m.k. voor één winding (formule (16)).

Zelfinductie.

Wanneer je door een draadklos een electrische stroom stuurt, zal binnen in die wikkeling een magnetisch veld ontstaan. Dat is trouwens ook het geval met een gewone draad. Daar het veld, dat om een gewone rechte draad ontstaat vaak niet sterk genoeg is, wekt men een magnetisch veld meestal op door middel van een spoel,

de practijk werkt men trouwens veel vaker met gesloten windingen dan met rechte geleiders.

Zolang de winding wordt bewogen, loodrecht op de richting van de krachtlijnen en zodanig, dat de gehele winding in het veld blijft, zal in de winding geen e.m.k. worden opgewekt. Dat is eenvoudig te begrijpen, als je bedenkt, dat in de twee verticale zijden van de winding e.m.k.'s worden opgewekt, welke beide naar boven zijn gericht (de krachtlijnen gaan weer van ons af, hetgeen is aangegeven door middel van kruisjes). In de winding werken twee e.m.k.'s elkaar tegen, omdat ze in tegengestelde richting een stroom zouden willen veroorzaken. Ze zijn overigens beide precies gelijk, omdat beide verticale zijden even lang worden verondersteld, even snel in het veld worden bewogen, terwijl in beide gevallen het veld gelijke sterkte heeft, omdat we een homogeen veld veronderstellen, dat is een veld, dat overal even sterk is en dezelfde richting heeft.

In de beide horizontaal getekende windingszijden worden geen e.m.k.'s opgewekt, omdat deze worden bewogen in de richting van de geleider, zodat geen krachtlijnen worden gesneden. Het resultaat is dus, dat in de winding twee gelijke, maar tegengestelde e.m.k.'s worden opgewekt, waarvan de som dus nul is.

Anders wordt het wanneer de winding het veld gaat verlaten. Deze toestand is nu getekend in fig. 8. De linkerzijde van de winding bevindt zich nog in het veld, maar de rechterzijde heeft het veld juist verlaten. Nu wordt in de rechterzijde geen e.m.k. meer opgewekt, in de linkerzijde nog wel. Deze laatste is dus tevens de e.m.k. welke in de winding wordt opgewekt.

Nemen we aan, dat de winding zich dus naar rechts beweegt en dat zij een korte tijd geleden het veld begon te verlaten, dan kunnen we de afstand, die de rechterzijde van de winding buiten het veld heeft afgelegd, b noemen. De hoogte van de winding noemen we l (de lengte van de opstaande geleiders, waarin de e.m.k.'s worden opgewekt), zodat een oppervlakte $b \times l$ zich buiten het veld bevindt. Noemen we deze oppervlakte dO (d betekent hier „een hele kleine verandering van") dan is dus $dO = b \times l$. Het oppervlak dO is ontstaan in een klein tijdsinterval, dat we met dt kunnen aanduiden (een kleine verandering van de tijd t). Beweegt de hele winding zich met een snelheid v cm per seconde naar rechts, dan is

de arbeid gelijk is aan de kracht die we moeten uitoefenen maal de afgelegde weg. De uit te oefenen kracht is gelijk aan de tegenwerkende kracht K_t, omdat op onze theoretische opstelling geen verdere krachten werken (b.v. geen wrijvingskrachten). We krijgen dus:

$$\text{vermogen} = \text{kracht} \times \text{weg/sec} = K_t \times v,$$

want de snelheid is de weg per seconde. De grootte van de kracht is ook bekend, nl. $K_t = 0{,}1\ B.I.l$, waarbij I de stroom is, die ontstaat als gevolg van de e.m.k.

Het vermogen, dat in de weerstand R in warmte wordt omgezet is gelijk aan de e.m.k. maal de stroom I, dus E.I. Daarbij wordt nog verondersteld, dat de geleider zelf geen weerstand heeft, daar anders in de geleider zelf vermogen verloren zou gaan.

In ons geval is dus:

$$\begin{array}{ccc} \text{electrisch vermogen} & = & \text{mechanisch vermogen.} \\ E.I & & 0{,}1\ B.I.l.v \end{array}$$

Deling door de stroom I geeft voor de e.m.k.: $e = 0{,}1\ B.l.v.$ Bij deze berekening is het electrisch vermogen berekend door eenvoudig de e.m.k. in volts te vermenigvuldigen met de stroom in ampères, hetgeen het vermogen in watts oplevert. Het mechanisch vermogen is echter in een andere eenheid uitgedrukt. De snelheid was in cm/sec, terwijl de kracht in dynes is uitgedrukt, hetgeen het vermogen oplevert in dyne.cm/sec. Nu is een watt 10^7 dyne.cm/sec zodat 1 dyne.cm/sec $= 10^{-7}$ watt en de door ons gezochte formule voor de e.m.k.:

$$e = 10^{-7}.0{,}1.B.l.v = 10^{-8}\ B.l.v \qquad (15)$$

Hebben we nu, zoals in fig. 8 is getekend, een gesloten winding in plaats van een rechte geleider en bewegen wij de winding in het magnetisch veld, dan kunnen wij een andere, eenvoudiger formule gebruiken. In

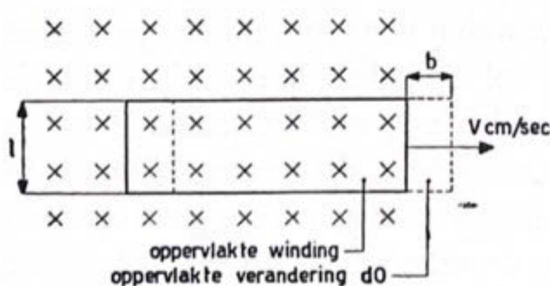


Fig. 8

$$H = \frac{0{,}4\ \pi\ I\ N}{l} \qquad (17)$$

waarin:

$\pi = 3{,}14$

I = de stroomsterkte door de spoel in ampères.

N = het aantal windingen van de spoel.

l = de lengte van de spoel in cm.

Bij deze afleiding hebben we aangenomen, dat het veld binnen in de spoel homogeen is, d.w.z. overal even sterk en gericht evenwijdig aan de spoelas. In werkelijkheid krijgt men veldvervorming, doordat de krachtlijnen van de spoelas gaan afbuigen en waardoor het veld alleen midden in de spoel de juiste richting heeft. Daar de afbuigende krachtlijnen niet meer meedoen neemt de veldsterkte ook af naarmate men zich meer naar de uiteinden van de spoel begeeft. De formule geldt hoe langer hoe meer naarmate de spoel een grote lengte heeft t.o.v. haar diameter.

Is de veldsterkte op een bepaald punt H en plaatsen we ijzer in dat punt met een permeabiliteit μ, dan zal de sterkte van het magnetisch veld, de inductie (in ijzer) gelijk worden aan $B = \mu . H$. Voor een spoel met ijzer geldt dus in plaats van (17):

$$B = \frac{0{,}4\ \pi\ I\ N\ \mu}{l} \qquad (18)$$

Willen we nog weten hoeveel krachtlijnen door de hele spoel gaan, m.a.w. hoe groot de magnetische *krachtstroom* is, dan behoeven we slechts het aantal krachtlijnen per cm^2 te vermenigvuldigen met de doorsnede van de spoel. Het aantal krachtlijnen per cm^2 is volgens afspraak gelijk aan de veldsterkte ter plaatse, zodat de krachtstroom gelijk is aan:

$$\Phi = \frac{0{,}4\ \pi\ I\ N\ \mu\ S}{l} \qquad (19)$$

Wanneer dus door een spoel een *constante* stroom wordt gestuurd, zal een veld ontstaan, dat constant is en met bovenstaande formule bij benadering kan worden berekend. Van groter belang

is dus steeds gericht loodrecht op de weg, zodat geen arbeid wordt verricht. Dit geldt eveneens voor de weg CD.

Langs de weg DA wordt evenmin arbeid verricht, omdat aldaar geen magnetisch veld heerst, althans niet dichtbij de buitenzijde van de spoel. Je kunt dit gemakkelijk aantonen, door een spoel te nemen en in lengterichting dwars door de spoel een stuk papier aan te brengen. Met een beetje knippen en passen lukt dit wel. Je krijgt dan een stukje papier, dat t.o.v. de spoel net als deze bladzijde is geplaatst. Strooi je nu een beetje ijzervijlsel op het papier en stuur je een stroom door de spoel (gelijkstroom!), dan zul je zien, dat de deeltjes ijzervijlsel zich gaan richten, waarbij je als het ware de krachtlijnen van het veld gaat zien (de deeltjes zijn nl. langwerpig en richten zich als kleine magneetjes onmiddellijk in de richting van de krachtlijnen op de plaats waar zij zich bevinden). Je zult dan tevens zien, dat buiten om de spoel wel krachtlijnen lopen, maar dichtbij de buitenzijde vrijwel niet. Wil je ook de krachtlijnen buiten om de spoel goed te zien krijgen, dan moet je vrij veel windingen nemen en een betrekkelijk grote stroomsterkte.

Daar de arbeid bij het éénmaal ronddraaien met een eenheid van Noordpool niet op de wegen AB, CD en DA wordt verricht moet dit geheel geschied zijn op de weg BC. Binnen in de spoel bevindt zich dan ook het veld.

Noemen we nu de veldsterkte H (dat is de veldsterkte van een magnetisch veld *in lucht*; in ijzer gebruikt men daarvoor de letter B), dan is de kracht, die op de eenheid van Noordpool werkt H dyne. De veldsterkte is nl. per definitie de kracht, die op een (natuurlijk denkbeeldige) eenheid van Noordpool werkt. De lengte van de weg BC is gelijk aan de lengte van de spoel, die we 1 cm hebben genomen. De verrichte arbeid op deze weg BC is dus ook gelijk aan (kracht maal weg) H.l dyne.cm. Daar nu de arbeid op twee manieren is uitgedrukt en in beide gevallen in dezelfde eenheid, kunnen we deze twee hoeveelheden arbeid aan elkaar gelijkstellen. Dan is dus:

$$H.l = 0{,}4\,\pi\, I\, N$$

en lossen we hieruit de gezochte veldsterkte H op, dan vinden we:

een tot een klos gewikkelde draad, waarvan elke winding meehelpt aan de opbouw van een sterk magnetisch veld. Het veld is het sterkste binnen in de spoel, omdat zich daar het grootste aantal samenwerkende krachtlijnen bevindt.

Natuurlijk kan het belangrijk zijn te weten hoe groot de veldsterkte wordt binnen in een spoel, waarvan het aantal windingen bekend is en de stroomsterkte, die door de spoel gaat. In fig. 9 is een doorsnede door een spoel getekend. Om nu de veldsterkte af te leiden moet je eerst weten, dat wanneer je een eenheid van Noordpool éénmaal om een geleider draait, een arbeid wordt verricht die gelijk is aan 0,4 π I dyne.cm, een formule, die wij niet zullen afleiden. Daarbij maakt het geen verschil of je de eenheid van Noordpool op een grote of kleinere afstand houdt van de geleider; als je maar éénmaal rond de geleider draait en weer in het punt van uitgang terugkeert. Beweeg je je nl. ver van de geleider dan zal de weg, die je moet afleggen om terug te keren tot het punt van uitgang groot zijn. De kracht, die dan op de eenheid van Noordpool werkt is evenwel klein en het resultaat is dat het product van kracht en weg (de verrichte arbeid) hetzelfde blijft.

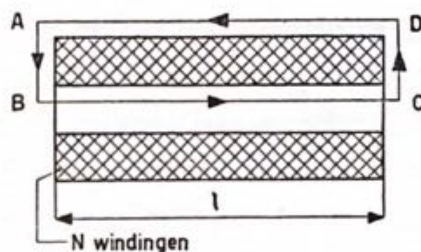


Fig. 9

Draai je niet om één geleider met een stroomsterkte I, maar om een aantal, N, dan is de verrichte arbeid N maal zo groot, omdat de kracht, die op de eenheid van Noordpool werkt ook N maal zo groot is. We draaien nu (in gedachten!) een eenheid van Noordpool langs de weg A B C D in fig. 9. Daarbij draait de eenheid van Noordpool inderdaad om een aantal geleiders, nl. de windingen van de spoel. We nemen aan, dat door de spoel een stroom I vloeit terwijl de spoel N windingen heeft, dan draaien we dus om N windingen en na éénmaal draaien is de verrichte arbeid gelijk aan 0,4 π I N dyne.cm (de kracht is uitgedrukt in dynes, de weg in cm).

Bewegen wij ons van A naar B, dan zal er geen arbeid worden verricht. Aangenomen, dat er krachtlijnen van het veld aanwezig zijn langs de weg AB, dan zijn deze lijnen toch gericht loodrecht op de weg AB. De kracht, die op de eenheid van Noordpool werkt

ijzerkernspoel ook de zelfinductie afnemen wanneer het ijzer verzadigd raakt.

Door de spoel kan nu een stroomverandering van 1 A/s ontstaan, d.w.z. dat de stroom met 1 A in één seconde verandert, of, wat natuurlijk hetzelfde is, met ½ A in ½ seconde. Hoe groot de e.m.k. van zelfinductie daardoor zal zijn hangt af van de zelfinductie van de spoel. Stel, dat de zelfinductie zo groot is, dat door die stroomverandering van 1 A/s een e.m.k. van juist 1 V wordt opgewekt, dan gaat (23) over in:

$$1 = L.1$$

hetgeen alleen mogelijk zal zijn als L ook 1 is. Daarom zal de spoel een zelfinductie van één eenheid hebben, wanneer een stroomverandering van 1 A/s juist een e.m.k. van zelfinductie van 1 V oplevert. Deze eenheid heet de Henry. Natuurlijk werkt men ook wel met kleinere zelfinducties die uitgedrukt worden in milli-henrys (mH) en zelfs in millioenste delen van een Henry, de micro-Henry (μH). Grotere eenheden dan de Henry worden in de practijk niet gebruikt, daar de eenheid al vrij groot is.

Zelfinductie speelt in de electrotechniek, evenals capaciteit, een zeer belangrijke rol en wij zullen spoedig zien, wat de gevolgen van zelfinductie in een electrische keten zijn.

Wederzijdse inductie.

Een ander belangrijk verschijnsel is dat van de wederzijdse inductie, dat niet moeilijk is te onderkennen, als je begrijpt hoe het zit met de zelfinductie.

Bij wederzijdse inductie gaat het ook om een spoel of in het algemeen een geleider, waarin een stroomverandering per tijdseenheid optreedt. Niet de e.m.k., die in de geleider zelf wordt opgewekt door deze stroomverandering is hier van belang, maar de e.m.k., welke wordt opgewekt in een andere geleider, welke zich in de buurt van de eerste bevindt.

In fig. 10 zijn twee geleiders getekend, waarvoor we weer spoelen hebben gekozen, ten einde een zo sterk mogelijk magnetisch veld te krijgen. De primaire spoel L_1 heeft een aantal windingen N_2. In de buurt van deze spoel bevindt zich de tweede spoel L_2, die een ander aantal windingen N_2 heeft.

andering in de spoel zelf, noemt men haar in dit geval een e.m.k. van *zelfinductie*. Zelfinductie is dus het verschijnsel, waarbij in een geleider (het hoeft niet altijd een spoel te zijn, ook een rechte geleider vertoont dit verschijnsel) een e.m.k. wordt geïnduceerd wanneer een stroomverandering optreedt. Wil men een geleider hebben die veel zelfinductie bezit, dan zal men in het algemeen een spoel nemen, omdat men daarmee een zo groot mogelijk veld kan opwekken en dus bij een bepaalde stroomverandering een zo groot mogelijke veldverandering. Een spoel is dus een onderdeel, dat veel zelfinductie bezit.

Voor alle windingen van de spoel samen is de geïnduceerde e.m.k. $e_L = 10^{-8}.N.d\Phi/dt$, waarbij de L aanduidt dat het gaat om een e.m.k. van zelfinductie; de L geeft in het algemeen het symbool voor zelfinductie. Vullen wij nu de in (21) gevonden uitdrukking voor de verandering in, dan krijgen we dus:

$$e_L = 10^{-8}.N. \frac{0{,}4\,\pi\,N\,\mu\,S}{l} \frac{dI}{dt}$$

en na samentrekken van beide factoren N:

$$e_L = 10^{-8} \frac{0{,}4\,\pi\,N^2\,\mu\,S}{l} \frac{dI}{dt} \qquad (22)$$

In deze formule nu is de breuk constant, want zowel het aantal windingen van de spoel N als de permeabiliteit μ als de doorsnede S en lengte l van de spoel verandert voor een bepaalde spoel niet. Alleen het gedeelte dI/dt verandert. Daarom kunnen we de breuk met de factor 10^{-8} vervangen door een constante, die we de coëfficient van zelfinductie noemen, zodat formule (22) overgaat in:

$$e_L = L\,dI/dt \qquad (23)$$

Wanneer nu een spoel geen ijzerkern heeft zal $\mu = 1$, maar wanneer wel een ijzeren kern aangebracht is zal μ groter zijn dan 1, *maar niet altijd constant*. Het is nl. een eigenschap van ijzer dat de permeabiliteit niet constant is zodra een zekere magnetisatie wordt bereikt. Het ijzer raakt verzadigd en de permeabiliteit neemt af. Daar deze permeabiliteit in de factor L is verwerkt zal dus van een

is het echter na te gaan, wat er gebeurt, wanneer in een spoel een stroom*verandering* ontstaat. Noemen we in het algemeen de stroom I, dan kunnen we een kleine verandering van de stroom aangeven met dI. Na deze verandering is dus de nieuwe stroomsterkte I + dI. Bij deze nieuwe stroom hoort dus ook een nieuw veld, waarvan de krachtstroom Φ kan worden berekend met (19). Daartoe vullen we in plaats van I de nieuwe waarde I + dI in:

$$\Phi + d\Phi = \frac{0{,}4\,\pi\,N\,\mu\,S}{l}\,(I + dI)$$

Dit kan gesplitst worden, evenals b.v. 6 (a + b) = 6 a + 6 b:

$$\Phi + d\Phi = \frac{0{,}4\,\pi\,N\,\mu\,S}{l}\,I + \frac{0{,}4\,\pi\,N\,\mu\,S}{l}\,dI \qquad (20)$$

We hebben dus nu in uitdrukking (19) het oorspronkelijke veld en in (20) het nieuwe veld. Het verschil is de veld*verandering*. Trekken we dus (19) van (20) af, dan houden we over:

$$d\Phi = \frac{0{,}4\,\pi\,N\,\mu\,S}{l}\,dI \qquad (21)$$

We nemen nu eens aan, dat we dus een stroomverandering in de spoel teweegbrengen, dan ontstaat daardoor een veldverandering, die we met behulp van (21) kunnen berekenen. In deze veldverandering bevindt zich echter een geleider: de spoel zelf. We zagen al, dat wanneer een winding en dus ook een aantal windingen (spoel) in een veld wordt bewogen, bij het verlaten van het veld een e.m.k. wordt geïnduceerd. We hebben zelfs al gezien hoe deze e.m.k. is te berekenen en in (16) hebben we een uitdrukking om de e.m.k. te bepalen wanneer de veldverandering per seconde bekend is. Uit deze uitdrukking valt af te leiden, dat de in de spoel geïnduceerde e.m.k. gelijk zal zijn aan N maal de veldverandering per tijdseenheid, omdat de spoel N windingen in serie geschakeld heeft. De oorzaak van de geïnduceerde spanning is de veldverandering en deze is weer veroorzaakt door de stroomverandering in de spoel. De geïnduceerde e.m.k. is natuurlijk „een e.m.k. van inductie", maar omdat deze inductie ontstaat door een stroomver-

$$e_W = M\ dI_1/dt \qquad (28)$$

waarin M de coëfficient van wederzijdse inductie voorstelt.

Voor deze coëfficient heeft men ook een eenheid en deze is dezelfde als die voor zelfinductie, omdat de verschijnselen zoveel op elkaar lijken. De eenheid van wederzijdse inductie is dus ook de Henry. Twee geleiders hebben een wederzijdse inductie van één Henry, wanneer een stroomverandering van 1 A/s in de eerste geleider een e.m.k. van wederzijdse inductie van juist 1 V in de andere geleider tot gevolg heeft.

We merken nog op, dat de koppeling kan worden beïnvloed door beide spoelen uit fig. 10 op een gemeenschappelijke ijzeren kern te plaatsen. Daar het magnetisch veld gemakkelijker door ijzer gaat dan door lucht zal het ijzer als het ware de krachtlijnen van het veld bij elkaar houden en dwingen in de tweede spoel te gaan. Zonder ijzer is het strooiveld, dat is het veld dat niet in L_2 komt, veel groter.

Soms werkt men opzettelijk met een kleine koppelfactor en heeft k een waarde van b.v. 1% (dus $k = \frac{1}{100}$). Bij transformatoren daarentegen heeft men graag een veel grotere k, zoveel mogelijk de waarde van 1 of 100% benaderend, hetgeen men tracht te bereiken door beide spoelen op een ijzeren kern te plaatsen. Bovendien maakt men deze kern dan van een zodanige vorm, dat het strooiveld, dat nog slechts enkele procenten van het primaire bedraagt zo klein mogelijk blijft.

Uit formule (22) en (23) blijkt, dat de zelfinductie is:

$$L = 10^{-8} \frac{0{,}4\,\pi\, N^2\, \mu\, S}{l} \qquad (29)$$

waarin L = de coëfficient van zelfinductie in Henrys.
N = het aantal windingen van de spoel.
μ = de permeabiliteit van het eventuele ijzer.

Deze formule laat duidelijk uitkomen, dat L evenredig is aan het kwadraat van het aantal windingen. Maak je dat dus b.v. 2 maal zo groot, dan wordt de zelfinductie van de spoel 4 maal zo groot.

waarbij de index w aangeeft dat we te maken hebben met wederzijdse inductie.

Vullen we nu de in (25) gevonden waarde voor $d\phi_1$ in (24) in, dan vinden we:

$$d\Phi_2 = k \frac{0{,}4\,\pi\, N_1\, \mu\, S}{l}\, dI_1$$

en vullen we dit in (26) weer in, dan hebben we de gevraagde e_w:

$$e_w = 10^{-8} .\, k\, . \frac{0{,}4\,\pi\, N_1 N_2\, \mu\, S}{l}\, dI_1/dt \qquad (27)$$

waarin N_2 meteen in de breuk is ondergebracht. Uit deze uitdrukking blijkt dus, dat e_w ontstaat als gevolg van de stroomverandering I_1 in de eerste spoel. In deze formule doet zich een soortgelijk geval voor als bij zelfinductie. De breuk is weer constant, zolang het eventueel aanwezige ijzer niet verzadigd raakt en we werken met twee bepaalde spoelen. Is de koppelfactor k ook constant, dan kunnen we het constante gedeelte vervangen door een nieuwe letter, waarvoor de M is gekozen, die de coëfficient van wederzijdse inductie wordt genoemd.

De koppelfactor k zal o.a. afhangen van de onderlinge ligging van de geleiders of spoelen. Liggen de geleiders dichter bij elkaar dan zal de secundaire meer krachtlijnen omvatten en zal dus Φ_2 een groter deel uitmaken van het totale oorspronkelijke veld dan wanneer de secundaire geleider ver van de primaire is verwijderd. Bij spoelen speelt ook de onderlinge stand een rol, daar in de ene stand de krachtlijnen Φ_2 veel gemakkelijker in de tweede spoel kunnen induceren dan in de andere stand. Lopen de krachtlijnen van Φ_2 nl. loodrecht op de as van de tweede spoel, dan zullen zij vrijwel geen e.m.k. van wederzijdse inductie opleveren. De koppelfactor k kan dus gevarieerd worden door de spoelen t.o.v. elkaar te verdraaien of te verschuiven; van deze eigenschap maakt men wel eens gebruik om een variabele koppeling te maken.

Vervangen we dus, voor een vaste koppeling, het constante gedeelte van (27) door M, dan krijgen we de algemene formule:

Sturen we nu door de primaire spoel een stroom I, dan zal een veld ontstaan, dat we kunnen aanduiden met Φ. Zoals schematisch in de figuur is aangegeven zal slechts een klein deel van dit veld in de tweede spoel terechtkomen, omdat het grootste deel verspreid wordt. Het deel, waarin de tweede spoel ligt noemen we het oorspronkelijke veld Φ_2. Indien de stroom I constant is zal ook Φ_1 constant zijn en zal in de tweede spoel L_2 geen e.m.k. worden opgewekt. Zodra echter een stroom*verandering* in L_1 ontstaat zal L_2 zich geplaatst zien in een veranderend veld en zal een e.m.k. opgewekt worden. Deze e.m.k. noemt men een e.m.k. van wederzijdse inductie. Hoe groot deze is valt vrij gemakkelijk te bepalen.

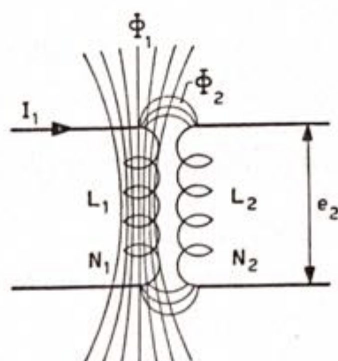


Fig. 10

Het veld Φ_2, dat in de tweede spoel terechtkomt is een deel van het totale veld Φ_1. Dat deel geven we aan met de letter k, de zgn. koppelfactor. Deze factor is natuurlijk altijd kleiner dan 1. Is b.v. $k = 0{,}2$, dan wil dat zeggen, dat een vijfde deel van het oorspronkelijke veld in de tweede spoel terechtkomt. Verandert het oorspronkelijke veld met bijv. $d\Phi_1$, dan zal de veldverandering in de tweede spoel ook maar een vijfde deel zijn van $dø_1$. In het algemeen dus:

$$\Phi_2 = k.\Phi_1 \qquad \text{en } d\Phi_2 = k.d\Phi_1 \tag{24}$$

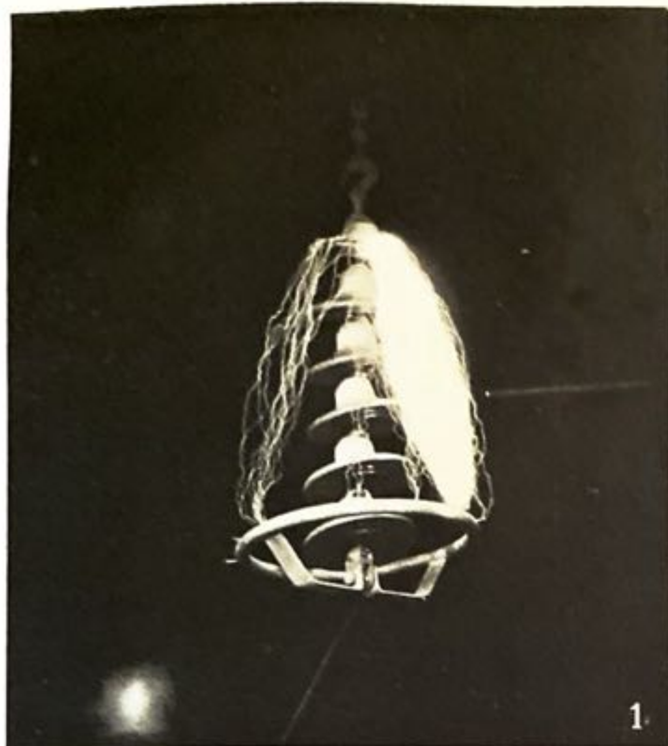
Nu is $dø_1$ gemakkelijk te bepalen uit (21):

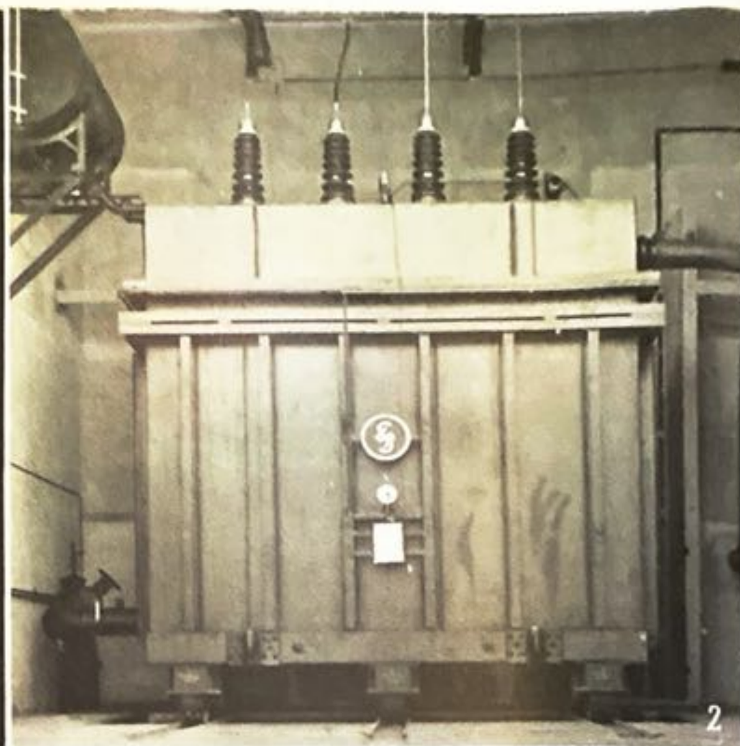
$$d\Phi_1 = \frac{0{,}4\,\pi\,N_1\,\mu\,S}{l}\,d\,I_1 \tag{25}$$

waarin dI_1 een index 1 heeft om aan te duiden dat het gaat om de stroomverandering in spoel L_1, terwijl de lengte l hier voorstelt de lengte van de krachtlijnen van het veld Φ_2. Deze krachtlijnen vormen een deel van alle krachtlijnen van het veld Φ_1 en alleen deze krachtlijnen zijn voor ons interessant, omdat zij alleen meewerken aan het opwekken van de e.m.k. van wederzijdse inductie.

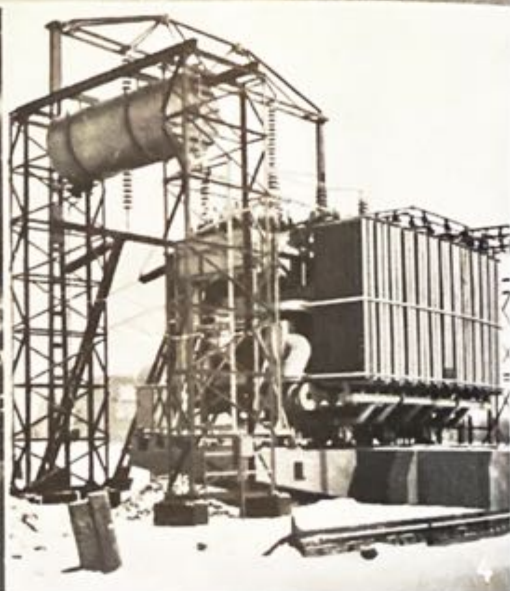
De opgewekte e.m.k. in L_2 is volgens (16) voor alle windingen van L_2:

$$e_W = 10^{-8}\,N_2\,d\Phi_2/dt \tag{26}$$







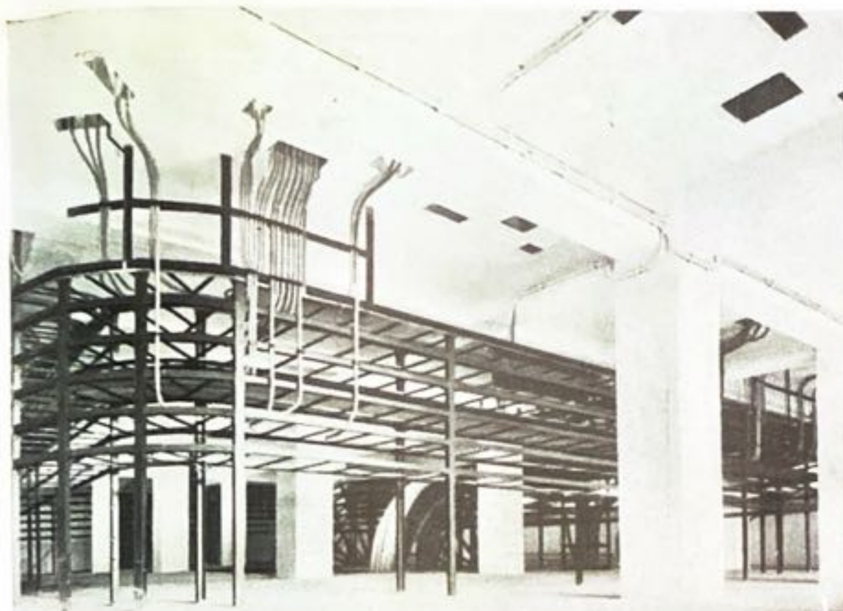


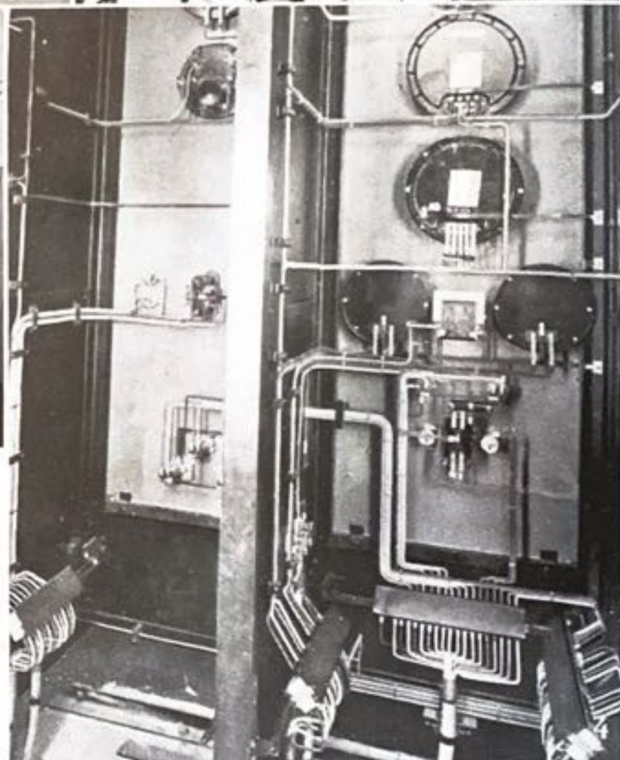
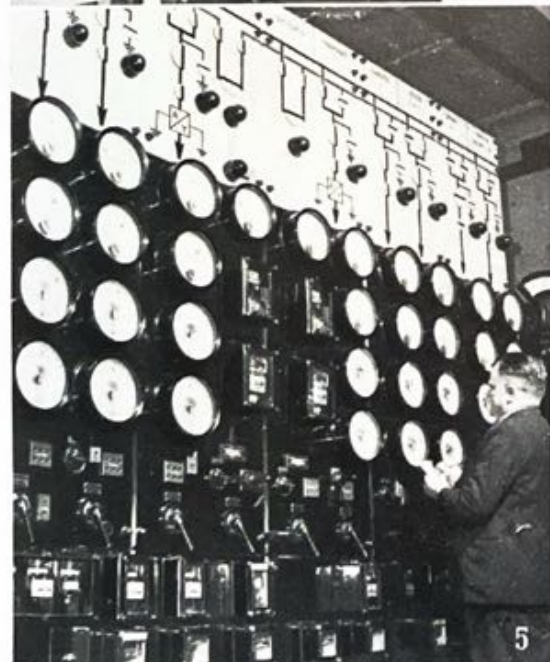


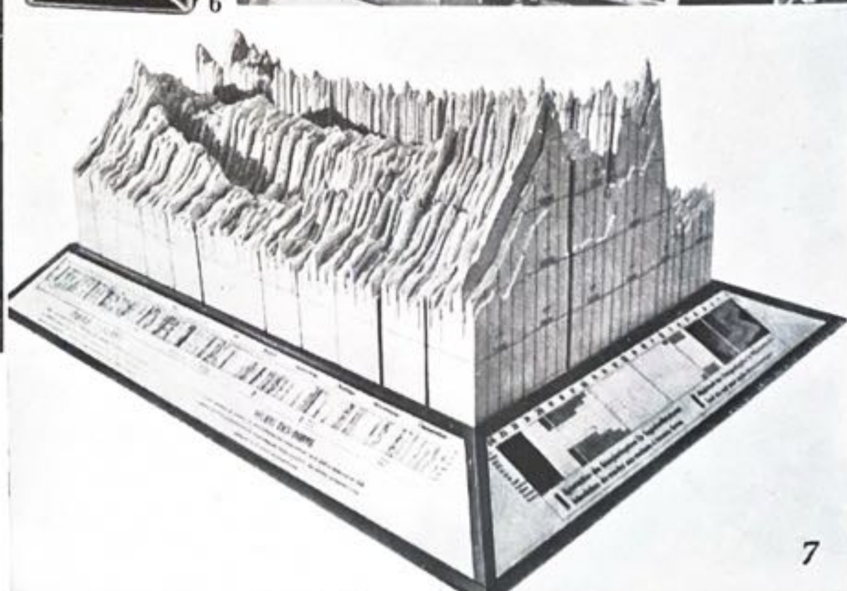


1. Overslag over een isolator in het laboratorium. 2. Grote hoogspanningstransformator. 3. Contrôlebord van een hydro-electrische centrale in Engeland. 4. Grote transformator voor 25/35 MVA en 150/10½ kV. 5. Panelen van een contrôlekamer met instrumenten voor metingen en stabilisatie van generatoren. 6. Overzicht van een moderne contrôlekamer.

(foto 2, 5 en 6 van Prov. El. Bedr. N. Holland; foto 3 van Brit. Inform. Services)



1. Kabelkelder. 2. Scheidingsschakelaars voor 132 kV. 3. Contrôlekamer van een grote centrale; alle schakelingen en metingen worden op afstand verricht vanuit deze kamer. 4. Achterzijde van een contrôlepaneel met meetinstrumenten, schakelaars, enz. 5. Meterpaneel voor het verrichten van metingen in het 33 kV systeem van het grote Engelse 132 kV hoogspanningsnet. 6. Registrerende ampèremeter. 7. „Belastingsgebergte"; grafiek in drie dimensies, aangevende de belasting dag voor dag en uur voor uur.

(foto 1 en 4 van Prov. El. Bedr. N. Holland; foto 2, 3 en 5 van British Information Services).

De coëfficient van wederzijdse inductie is, zie formule (27) en (28) :

$$M = 10^{-8} . k. \frac{0,4 \pi N_1 N_2 \mu S}{l}$$

waarin M = de coëfficient van wederzijdse inductie in Henrys.
N_1 = het aantal primaire windingen.
N_2 = het aantal secundaire windingen.

Deze formule leert ons dus, dat M recht evenredig is aan het aantal windingen van beide spoelen.

Wisselstromen.

In de electrotechniek werkt men het meest met wisselstromen. Zonder te diep op de theorie in te gaan moeten we toch enige begrippen kennen, willen we later iets van de electrotechniek begrijpen.

Een wisselstroom is een stroom, die periodiek van richting verandert. Hoewel men vele soorten wisselstromen kent is voor de electrotechniek de sinusvormige (fig. 11a boven) wel de belangrijkste. De in fig. 11 afgebeelde lijnen zijn grafieken van de stromen (of spanningen), getekend van ogenblik tot ogenblik. Op de horizontale as van deze grafiek is de tijd afgezet; op de verticale de spanning of de stroom. Wil je dus de waarde van de stroom op een bepaald tijdstip weten, dan zoek je dat tijdstip op de horizontale as op en je kijkt op welke afstand de grafiek van de tijdas op dat punt is ver-

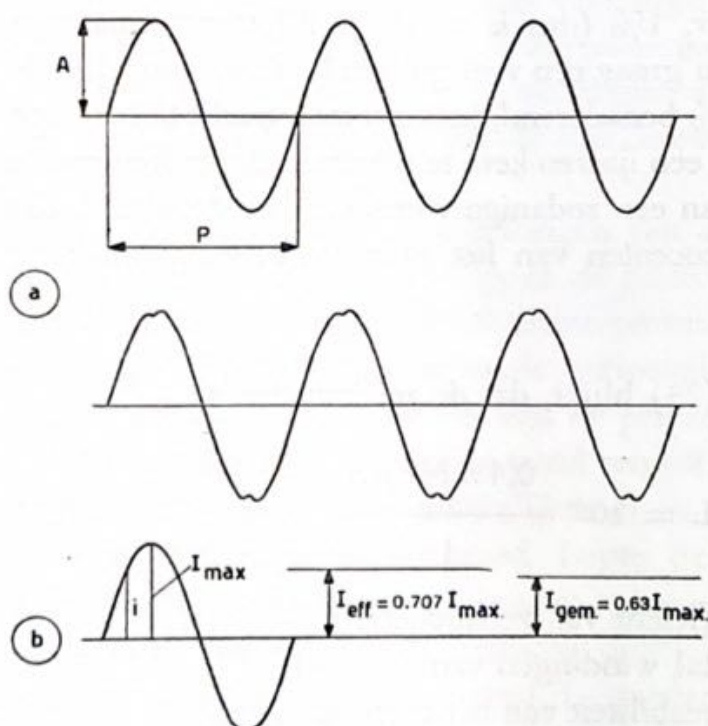


Fig. 11

heeft hij een zekere lading, afhankelijk van zijn capaciteit en van de spanning. We hebben immers gezien, dat Q = C.V. Een grote capaciteit of een grote spanning, of beide kunnen dus een grote lading tot gevolg hebben. Wil deze lading in de condensator komen, dan zal er een lading*verschuiving* plaats hebben en dat betekent stroom! Er is dus direct na het aansluiten even een electrische stroom in de aansluitdraden van de condensator, *niet* in de isolatie tussen de electroden van de condensator.

Sluiten wij nu op een condensator een wisselspanning aan, dan zal, doordat de spanning steeds van waarde verandert, de lading van de condensator veranderen, hetgeen een stroom betekent in de aansluitdraden en in de stroombron. In het diëlectricum, zoals de isolatie heet, gaat dus geen stroom.

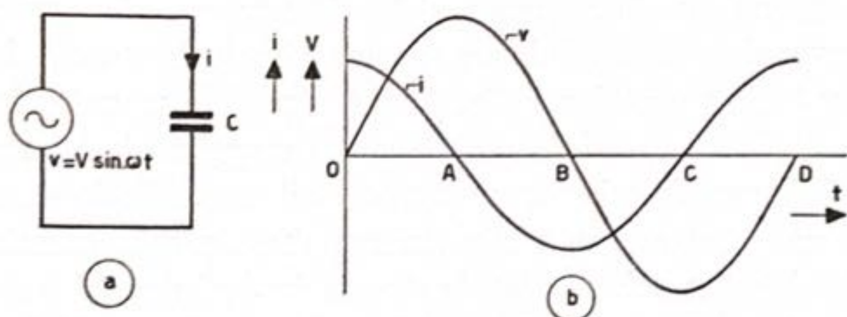


Fig. 13

In fig. 13 nu is een stroombron met een sinusvormige spanning v getekend. Dat de spanning sinusvormig verloopt geven wij aan met $v = V_m \sin \omega t$, waarin V_m voorstelt de amplitude van de spanning, sin een afkorting van sinus, $\omega = 2\pi$ maal de frequentie, dus $2\pi f$ of 6,28 f, omdat $\pi = 3{,}14$ en t tenslotte de tijd. Het is niet direct nodig, dat je deze „formule" begrijpt, zodat je niet hoeft te schrikken! Zie je echter deze aanduiding, dan weet je, dat het gaat om een wisselspanning die ook nog sinusvormig is.

Op de stroombron van fig. 13 is aangesloten een capaciteit, een ideale condensator dus. We nemen aan, dat alles ideaal is, zodat de aansluitdraden ook geen weerstand hebben. Dat doen we in theorie wel meer en dat mag ook wel, want zelfs al hebben de draden weerstand in de practijk, dan nog kun je ervoor zorgen, dat de weerstand zo klein is, dat zijn invloed kan worden verwaarloosd.

is. Inderdaad zal $V_m = 1{,}41\ V_{eff} = 1{,}41 \times 220 = 308$ V. Soms moet je hiermee rekening houden, b.v. wanneer je een condensator op een wisselspanning aansluit, die boven een bepaalde doorslagspanning doorslaat en daarmee stuk is. Zo zal een condensator, die doorslaat bij 290 volt, ook inderdaad doorslaan, als je hem op een wisselspanning van 220 volt aansluit. Hij krijgt dan 100 keer per seconde (50 keer positief en 50 keer negatief) even te veel spanning, nl. 308 V.

Het gedrag van wisselstromen in verschillende schakelingen.

Daar we in de electrotechniek voor een groot deel met wisselstromen werken is het van groot belang, dat je weet wat er gebeurt, wanneer je een wisselspanning aansluit op verschillende soorten schakelingen met weerstand, capaciteit en zelfinductie.

Weerstand: Wanneer een wisselspanning op een weerstand wordt aangesloten, dan zal de daaruit ontstane stroom dezelfde vorm hebben als de spanning, terwijl de stroom op dezelfde ogenblikken als de spanning zijn maximum-, minimum- en nulwaarden bereikt. We zeggen dan dat de stroom en de spanning *in fase* met elkaar zijn. De waarde van de stroom kan je berekenen met de wet van Ohm, dus $I = E/R$. Zou men alleen weerstanden hebben, dan was de wisselstroomtheorie al erg makkelijk, maar dan zouden we ook weinig met wisselstromen kunnen doen.

Capaciteit: Sluit je een wisselspanning aan op een capaciteit, dan ontstaat eveneens een stroom met dezelfde vorm (dus sinusvormige wisselspanning geeft een sinusvormige wisselstroom). De stroom en de spanning zijn echter niet meer in fase. De stroom bereikt zijn maximum-, minimum- en nulwaarden op andere ogenblikken dan de spanning. Hoe dat mogelijk is zullen wij thans nagaan.

De eerste vraag is: waarom laat een capaciteit een wisselstroom door? Tussen de electroden van de capaciteit is immers een isolator? Inderdaad laat een condensator in werkelijkheid ook geen stroom door. Sluit je een gelijkspanning op een condensator aan, dan krijgt de condensator een lading, maar van een stroom is geen sprake. Wat echter wel belangrijk is, is dat bij het aansluiten van de condensator wèl even een stroom heeft gevloeid. Dat is trouwens wel duidelijk: eerst had de condensator geen lading, na de aansluiting

wijderd. Dat kan dan natuurlijk zowel naar boven zijn (positief) als naar beneden (negatief); dat hangt ervan af op welk tijdstip je de stroomwaarde wilt weten.

De momentele waarde van een stroom is de waarde, die op een bepaald moment bestaat (fig. 11b: de waarde i).

De amplitude van een wisselstroom is de grootste momentele waarde, die in de periode optreedt (fig. 11a: het stuk A). In fig. 11b is de grootste momentele waarde I_m gelijk aan de amplitude.

De effectieve waarde van een wisselstroom is de waarde van een denkbeeldige gelijkstroom, die in dezelfde tijd dezelfde energie zou opleveren als de wisselstroom.

Dit vereist enige uitleg. Wanneer je de grafiek van de wisselstroom bekijkt, dan zie je, dat er ogenblikken zijn, dat de waarde van de stroom nul is. Er zijn ook ogenblikken dat de waarde van de stroom maximaal is (I_{max} of I_m). Het is duidelijk, dat de stroom niet zoveel energie in een bepaalde tijd kan veroorzaken als wanneer hij doorlopend de waarde I_m behield, terwijl hij natuurlijk méér doet, dan wanneer hij doorlopend nul bedroeg. Daar het nu het meest interessante is te weten hoeveel energie de wisselstroom levert, heeft men een nieuwe (denkbeeldige) waarde ingevoerd, die overeenkomt met een gelijkstroom, die hetzelfde zou moeten doen als nu de wisselstroom.

De effectieve waarde van een *sinusvormige* wisselstroom of -spanning bedraagt $\frac{1}{2}\sqrt{2}$ maal de amplitude, dus $I_{eff} = 0{,}707\ I_m$ en $I_m = 1{,}41\ I_{eff}$.

Je moet wel even bedenken, dat de negatieve halve perioden (dat zijn in de grafiek de delen van de lijn, welke zich beneden de tijdas bevinden) ook meewerken aan het leveren van energie. Het is in het algemeen niet zozeer van belang in welke richting de stroom vloeit; denk maar eens aan een gloeilamp, die evengoed opgloeit wanneer de stroom van richting wordt omgekeerd.

In sommige gevallen kan het van belang zijn te weten wat de *gemiddelde waarde* van een wisselstroom is. Een draaispoelmeter wijst b.v. de gemiddelde waarde aan van de stroom, die je aan de klemmen aansluit. Die gemiddelde waarde vind je door alle momentele waarden bij elkaar op te tellen en deze som te delen door het aantal momentele waarden. Dit is wel een beetje vreemd, want er

dan vindt men $X_C = 1/\omega C$, waarin $\omega = 2\pi f$. Willen we dus weten welke capaciteit de condensator moet hebben om een reactantie van 100 ohm te bezitten, dan moeten we nog weten welke frequentie gebruikt wordt. Meestal gebruiken we een frequentie bij lichtnetten van 50 Hz, zodat:

$$X_C = 1/\,2 \times 3{,}14 \times 50 \times C = 100$$

Het is nu niet moeilijk C op te lossen en we vinden $C = \dfrac{1}{31400}$ Farad = ongeveer 32 μF.

Zelfinductie: We hebben geleerd wat zelfinductie is. Wanneer nu een wisselspanning op een zelfinductie wordt aangesloten, dan zal een wisselstroom het gevolg zijn en het blijkt, dat de stroom 90° in fase is verschoven met de spanning. De faseverschuiving is echter zodanig, dat de stroom naijlt bij de spanning. De wisselstroomweerstand van een zelfinductie is dus weer een reactantie. Berekent men de reactantie van een zelfinductie L, dan vindt men $X_L = \omega L$, waarin weer $\omega = 2\pi f$. Bij de berekening is dan natuurlijk ook uitgegaan van de veronderstelling, dat $X_L = E/I$, zodat je niet moet denken dat dat zo toevallig mooi uitkomt; het is er op gemaakt om mooi uit te komen!

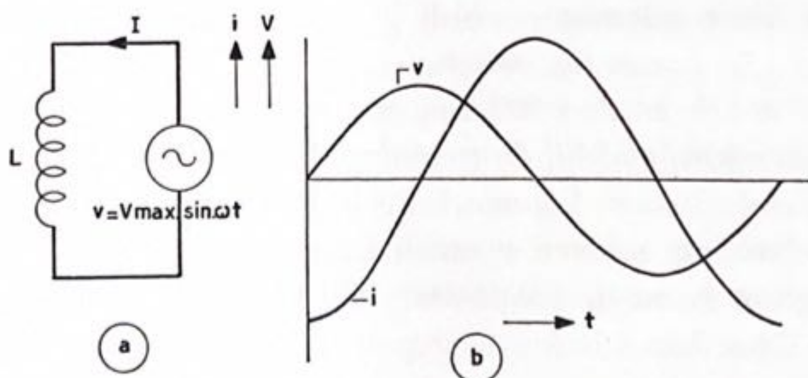


Fig. 14

Dat een zelfinductie zich niet als een weerstand gedraagt is te danken aan het feit, dat op elk ogenblik de spanning verandert. In fig. 14 is een stroombron getekend, die een sinusvormige wisselspanning $v = V_m \sin \omega t$ levert. Op de bron is aangesloten een ideale zelfinductie L. Deze heeft dus geen weerstand, hetgeen in werkelijkheid niet te maken is, omdat je een spoel moet hebben

(dat is bij 0), dan is de stroom i zo groot mogelijk, enz. Je begrijpt nu, dat bij A de stroom nul wordt, evenals bij C, terwijl hij bij B en D weer nul is.

Hoewel de condensator dus feitelijk geen stroom doorlaat, zal een capaciteit in een wisselstroomketen wel degelijk een stroom tot gevolg hebben. De capaciteit vormt daarom een *schijnbare weerstand,* die we ter onderscheiding van een werkelijke (ohmse) weerstand een wisselstroomweerstand of *impedantie* noemen.

Verdelen we de periode in 360 graden, dan kan men zeggen dat de stroom door een condensator 90°, dat is ¼ periode vóórijlt bij de spanning. Wanneer je denkt, dat de stroom door de spanning ontstaat klinkt dat heel vreemd, want de stroom wordt immers veroorzaakt door de spanning? Nu je weet, dat het niet de spanning, maar de *snelheid* van de spannings*verandering* is, die de stroom veroorzaakt, kun je gemakkelijker begrijpen, dat de stroom bij de spanning kan vóórijlen.

Stroom en spanning zijn dus niet „in fase". We spreken hier van een *faseverschuiving* van 90°. Een impedantie nu is een schijnbare weerstand, die een faseverschuiving teweegbrengt, want als er geen faseverschuiving optreedt gedraagt de weerstand zich net als bij gelijkstroom en is dus een zuivere ohmse weerstand. De impedantie, die door de condensator wordt gevormd is een bijzondere impedantie, omdat ze een faseverschuiving geeft, die juist 90° is. Grotere faseverschuivingen dan 90° komen niet voor. Bij de condensator is de stroom vóórijlend bij de spanning. Later zullen wij zien hoe we een naijlende stroom kunnen krijgen. Een impedantie, die net 90° faseverschuiving oplevert noemen we een *reactantie.*

Hoe groot is nu de reactantie? Wij kiezen die zo groot, dat de wet van Ohm kan worden toegepast. De reactantie van de condensator is:

$$X = \frac{E}{I}$$

waarin X = de reactantie, E is de spanning en I de stroom is. Wanneer nu een spanning van 100 V een stroom van 1 A oplevert, dan is dus de reactantie van de condensator 100 ohm.

Berekent men in het algemeen de reactantie van een condensator,

Er zijn nu ogenblikken dat de spanning positief is (zoals aangegeven in fig. 13), de condensator heeft dan dezelfde spanning. Zou hij een lagere spanning hebben, dan zou er onmiddellijk een stroom vloeien om die spanning gelijk te maken. Dat vloeien van die stroom zou wel gemakkelijk gaan, want er is geen weerstand. Je kunt dus wel aannemen, dat de condensator op elk ogenblik dezelfde spanning heeft als de stroombron. De spanning van deze echter daalt, waardoor ook de spanning van de condensator daalt (en dus ook zijn lading). Deze lading verlaat de condensator via de aansluitdraden, waarin dus een stroom vloeit. Op een goed ogenblik is de spanning van de stroombron nul en begint zij negatief te worden. De condensator gaat met zijn spanning (en zijn lading dus) rustig mee, maar daarvoor moet nog steeds een stroom vloeien in de draden en door de stroombron.

Je kunt nu misschien inzien, dat juist wanneer de condensator zijn maximale of zijn minimale spanning heeft de stroom door de keten zo klein mogelijk zal zijn. Juist wanneer de spanning bezig is van positief naar negatief over te gaan of omgekeerd, dus wanneer de grafiek van de wisselspanning zo steil mogelijk loopt zal de stroom zo groot mogelijk zijn (in een van de twee richtingen). Inderdaad is het ook zo, dat de stroom in de keten (die door de condensator *schijnbaar* vloeit) niet door de spanning wordt bepaald, maar door de *snelheid waarmee de spanning verandert*. Dat is dus heel wat anders. Deze snelheid kun je meten naar de steilheid van de grafiek van de spanning en dan zie je, dat bij de maximale en minimale waarden de steilheid nul is, omdat daar de grafiek juist horizontaal loopt. Op die ogenblikken is de stroom door de keten dus nul. Daarentegen zal op de ogenblikken, dat de wisselspanning de nulwaarde passeert de snelheid van de spanningsverandering zo groot mogelijk zijn en dus ook de stroom door de keten.

In fig. 13 zijn dan ook grafisch voorgesteld: de wisselspanning en de wisselstroom. Op de horizontale as is de tijd uitgezet. Op de verticale zowel de spanning in volts als de stroom in ampères. De ene grafiek is niet groter dan de andere, want je kunt volts niet met ampères vergelijken; de grootte van de twee grafieken hangt eenvoudig af van de gekozen schaal op de verticale as.

Verandert dus de spanning v in positieve richting zo snel mogelijk

(fig. 17b), dan kunnen wij de verschillende spanningsvectoren wel vinden. De stroom I_t gaat door de weerstand R. De stroom en spanning in deze weerstand zijn in fase. De vector V_R (deelspanning over de weerstand) moet dus in dezelfde richting wijzen als de vector I_t. Dezelfde stroom I_t gaat ook door de capaciteit C (schijnbaar!). De spanning V_c moet zodanig zijn, dat de stroom 90° vóórijlt bij die spanning. Dit is mogelijk als we de vector naar beneden uitzetten. Daar het vectordiagram linksom draait (een kwestie van afspraak) zal vector V_c 90° nakomen bij de vector I_t.

Wanneer je nu de totale spanning wilt vinden, dat is dus $V_R + V_C$, dan kun je die spanningen niet zonder meer optellen. Doordat zij niet in fase zijn moeten zij zgn. vectorisch opgeteld worden. Dit is b.v. in het diagram mogelijk door een parallelogram te maken van de vectoren, die we willen optellen (V_C en V_R) en daarvan de diagonaal te tekenen. In het bijzondere geval van fig. 17b hebben we een rechthoek, omdat V_C en V_R loodrecht op elkaar staan. De diagonaal V_t is dan de „som" van de twee spanningen over de weerstand en de capaciteit. V_t is het resultaat dat je verkrijgt als je de deelspanningen V_C en V_R in serie schakelt. Vandaar dat men V_t de resultante noemt van de twee vectoren. V_t is niets anders dan de spanning van de stroombron. Het blijkt dus, dat de spanning V_t een stroom door de serieschakeling bewerkstelligt, die voorijlt, maar niet 90°. De hoek van voorijlen, de faseverschuivingshoek is kleiner dan 90° en is in het diagram aangegeven met φ_t. Tevens kun je dan zien, dat naarmate R groter wordt, de deelspanning V_R ook groter wordt en als C dezelfde waarde houdt, de faseverschuivingshoek kleiner wordt.

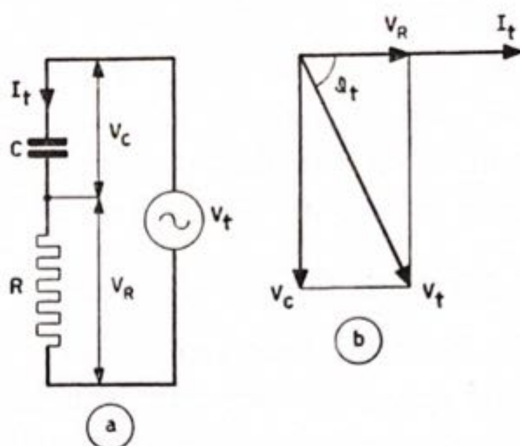


Fig. 17

Mocht je de waarde van de deelspanningen willen weten, dan kan dat natuurlijk. Stel, je hebt een spanning van 100 V, C = 8 μF en R = 300 ohm; de frequentie is 50 Hz. De berekening is nu

wijst de hoogste waarde van v wordt bereikt; v is de loodlijn, die uit de pijlpunt op de horizontale tijdas wordt neergelaten. Deze loodlijn stelt de momentele waarde van de spanning voor. Ten tijde $t = t_a$ is dus de momentele waarde van de spanning v_a. Om het bijbehorende punt P van de grafiek te vinden hoef je alleen maar het stukje v_a aan te halen tot je op de tijdas op het punt t_a bent gekomen.

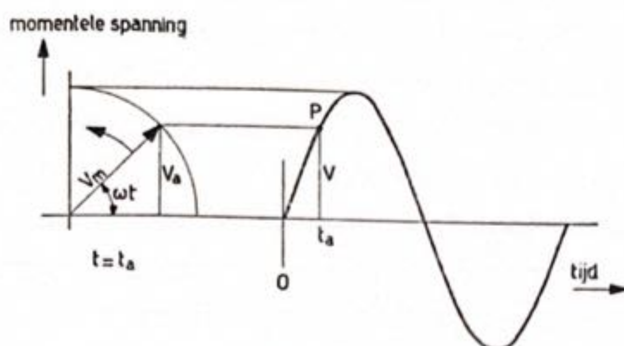


Fig. 16

Even later is natuurlijk de vector verder (linksom) gedraaid en zal de loodlijn v ook groter geworden zijn. Op deze manier kun je elk punt van de grafiek vinden en deze dus construeren. Voor diegenen die goniometrie op school hebben gehad is het nog interessant te weten, dat dit eenvoudig de constructie is van een sinusoide, een lijn, waarvan de vergelijking luidt: $y = A \sin x$. In dit geval stelt y de momentele spanning v voor, A de grootst optredende waarde, dus de amplitude V_m, terwijl x de hoek is, die de vector op een bepaald ogenblik heeft doorlopen, ω t. Je krijgt dan de reeds vermelde vergelijking $v = V_m \sin \omega t$.

In één diagram kunnen verschillende vectoren worden getekend. Dit is b.v. in fig. 15b gedaan voor een wisselspanning, die op een condensator wordt aangesloten. Alle vectoren draaien (even hard) linksom. Tekenen we de spanning v naar rechts, dan wijst de stroom I_c naar boven, want deze stroom ijlt 90° vóór op de spanning. Zo wijst de stroomvector I_L in fig. 15c naar beneden, omdat de stroom in een zelfinductie 90° naijlt bij de spanning.

Capaciteit in serie met weerstand.

In fig. 17 is een capaciteit C in serie met een weerstand R aangesloten op een sinusvormige wisselspanning Vt. Er ontstaat een stroom, terwijl over capaciteit en weerstand deelspanningen staan. In de serieschakeling moet de stroom wel overal even groot zijn, m.a.w. er is maar één stroom I_t. Tekenen wij deze als vector

om flink wat zelfinductie te krijgen, terwijl de draad van de spoel natuurlijk wèl ohmse weerstand heeft. Indien op elk ogenblik de spanning verandert zal de stroom dus willen veranderen. Deze stroomverandering, die theoretisch zeer groot zou zijn, omdat er geen weerstand is (oneindig groot dus zelfs) heeft een magnetische veldverandering tot gevolg. Deze veldverandering levert een e.m.k. van zelfinductie op, die echter tegengesteld is aan de e.m.k. van de stroombron. Al is de e.m.k. van zelfinductie nog maar weinig minder dan de spanning van de stroombron, het verschil zal toch in staat zijn een geweldig grote stroom door de keten te veroorzaken, omdat de weerstand nul wordt verondersteld. De toeneming van de stroom, die nodig is om deze grote stroomsterkte te verkrijgen zou voldoende zijn om de e.m.k. van zelfinductie tenslotte precies gelijk te maken aan de spanning van de stroombron.

In fig. 14b zijn de grafieken getekend voor de spanning en de stroom in het geval van fig. 14a. Het blijkt, dat de stroom 90° naijlt bij de spanning.

Voorstelling van wisselstroomgrootheden door vectoren.

In de wisselstroomtechniek werkt men veel met vectoren. Je kunt nl. een sinusvormige wisselstroom of -spanning voorstellen door een ronddraaiende pijl met een lengte gelijk aan de amplitude, terwijl het aantal omwentelingen per seconde gelijk moet zijn aan de frequentie (fig. 15a). Dit komt overeen met de voorstelling door middel van een grafiek. Deze overeenkomst is weergegeven in fig. 16. Daar is de pijl, die *vector* wordt genoemd getekend op een bepaald ogenblik, dat we hebben aangegeven met t_a. In de figuur is ook de grafiek van de wisselspanning getekend. De lengte van de vector is gelijk aan de amplitude V_m. Dit blijkt wel als je bedenkt, dat wanneer hij naar boven

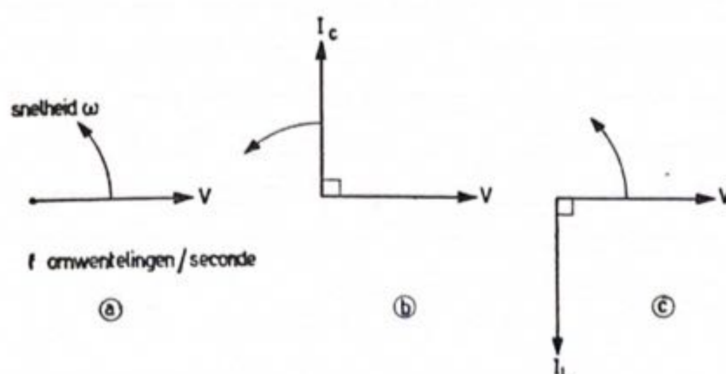


Fig. 15

men de faseverschuivingshoek φ_m, dan kunnen we een vectordiagram maken (fig. 20c).

Ter verbetering van de faseverschuiving is het nu mogelijk een condensator (of een batterij condensatoren) parallel op het net aan te sluiten. Men zou b.v. de faseverschuiving *in het net* tot nul terug kunnen brengen. In fig. 20b is de schakeling weergegeven, terwijl het vectordiagram voor dit geval in fig. 20d is getekend. De stroom I_m blijft onveranderd, wat zijn grootte en richting betreft. Er komt echter nog een stroom I_C bij, die 90° vóórijlt. De grootte van I_C bepaalt nu de richting van de resultante, de totale netstroom dus. We kunnen, zoals in fig. 20d ook is verondersteld, I_C zo groot maken, dat de totale stroom in fase komt met de netspanning.

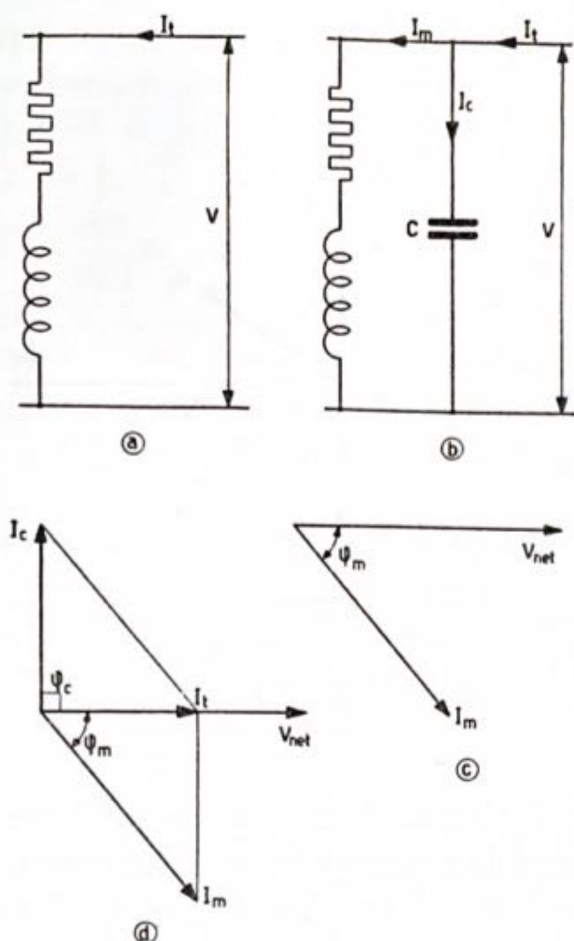


Fig. 20

Het bepalen van de benodigde capaciteit is mogelijk door berekening. Meestal zal men het probleem grafisch oplossen. Men maakt daartoe een vectordiagram, zo nauwkeurig mogelijk. Men tekent een vector I_C net zo lang als nodig is om de gewenste totale netstroom te krijgen. Meet men nu met een liniaal de lengte van I_C en heeft men de tekening netjes op schaal gemaakt, dan weet men de condensatorstroom I_C, waarna het met de wet van Ohm een klein kunstje is de gewenste capaciteit te bepalen.

De vraag doet zich voor wat het nadeel kan zijn van een grote

Daar in een electrische motor spoelen moeten worden gebruikt, zal een motor dus een naijlende stroom opnemen. Hiertegen kan soms bezwaar bestaan. Men gaat er dan toe over de faseverschuiving te verbeteren door condensatoren bij te schakelen.

Heeft men weerstand, zelfinductie en capaciteit in serie, dan ontstaat het schema van fig. 19. De deelspanningen kun je nu wel uitrekenen. In het vectordiagram valt nog op te merken, dat je bij het optellen van de deelspanningen, eerst de capacitieve en inductieve deelspanningen bij elkaar optelt. Deze werken nl. langs eenzelfde lijn, zodat je ze wel gewoon algebraïsch kunt optellen (of liever aftrekken, omdat ze in tegengestelde richting werken). Het verschil $V_L - V_C$ stel je dan vectorisch samen met V_R. Het resultaat in fig. 19 is, dat de stroom I_t naijlt bij de spanning V_t, zodat de schakeling zich nog inductief gedraagt. Natuurlijk is het mogelijk te zorgen dat de schakeling zich capacitief gedraagt, dus dat de stroom voorijlt bij de spanning. Uit de figuur blijkt duidelijk, dat je alleen hoeft te zorgen, dat de capacitieve deelspanning V_C groter wordt, hetgeen je kunt bereiken, door een andere waarde voor C te nemen.

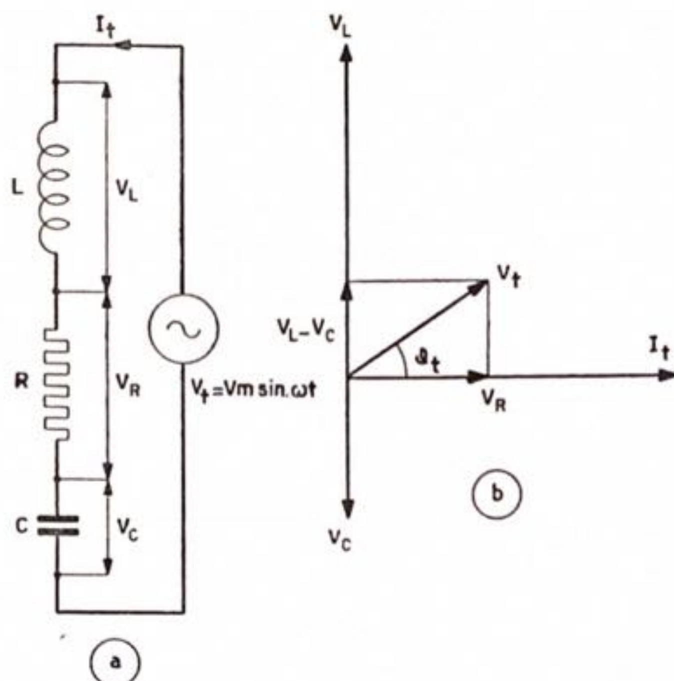


Fig. 19

In fig. 20a is verondersteld, dat we een motor hebben, die aangesloten op een net met een spanning V een stroom opneemt I_m. Daar er geen verdere toestellen op het net zijn aangesloten zal I_m tevens de totale stroom I_t zijn. Deze stroom echter zal naijlen bij de spanning, omdat een motor zich inductief gedraagt. Bepaalt

eenvoudig. Begin de reactantie van de condensator te bepalen: $X_C = 1/\omega\ C = 1/\ 2\ \pi.50.8.10^{-6} = 400$ ohm (10^{-6} betekent $\frac{1}{10^6}$, dus een millioenste; we moeten C nl. in farads invullen).

De impedantie van de schakeling kun je uitrekenen, waarbij je wel moet bedenken, dat een reactantie iets anders doet dan een weerstand. De optelling moet weer vectorisch geschieden: $Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$, evenals in fig. 17 b $V_t = \sqrt{V_C^2 + V_R^2}$ dus $Z = \sqrt{16\,000 + 9\,000} = 500$ ohm. De stroom bedraagt dus $I = \frac{100}{500} = 200$ mA. De spanning over de weerstand is dus $R.I = 300 \times 0{,}2 = 60$ V en over de condensator $X_C.I = 400 \times 0{,}2 = 80$ V. Zoals je ziet is $60 + 80$ niet gelijk aan 100, maar tel je de spanningen vectorisch op, dan krijg je precies 100; de spanningen staan immers 90° t.o.v. elkaar in fase verschoven.

Zelfinductie in serie met weerstand.

Dit is het geval van een practische spoel, die dus zelfinductie heeft, maar ook ohmse weerstand van de draad. Deze weerstand kan men in serie geschakeld denken met de zelfinductie. In fig. 18 is dit schematisch getekend met het bijbehorend vectordiagram. De spanning V_t veroorzaakt een stroom I_t door de serieschakeling. Tekent men deze stroom in het vector diagram, dan hebben we meteen de richting van de deelspanning V_R, die in fase moet zijn met deze stroom. De deelspanning V_L over de zelfinductie moet zodanig zijn gericht, dat de stroom door de zelfinductie, dat is I_t 90° naijlt bij de spanning. De totale spanning V_t vind je weer door de deelspanningen vectorisch op te tellen. De stroom ijlt dan een hoek φ na bij de spanning van de stroombron.

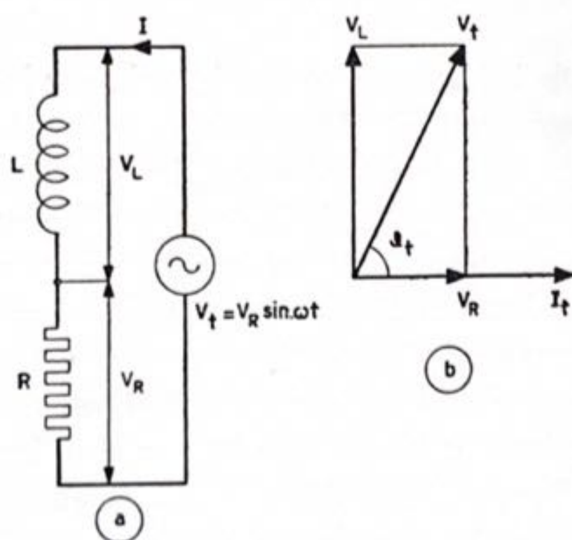


Fig. 18

condensatoren, die voor een dergelijke grote compensatiestroom kan zorgen is behoorlijk duur. Of je zo'n batterij dus zult aanschaffen zal afhangen van de kosten van de condensatoren en het verschil in prijs voor je electriciteit. Kost die batterij condensatoren b.v. *f* 15.000, maar bereken je dat je *f* 15.000 per jaar aan electriciteitsrekeningen kunt besparen, dan doe je het natuurlijk direct: na één jaar heb je de kosten van de condensatoren eruit en elk volgend jaar dat de condensatoren meegaan bespaar je 15.000 gulden!

Niet altijd ben je verplicht je cos φ te verbeteren. In sommige gevallen kan het electriciteitsbedrijf je echter wel degelijk dwingen, omdat het òf niet in staat is de transformatoren, kabels enz. te verzwaren, òf het risico niet wil nemen, dat het veel kosten aan deze verzwaring gaat besteden, terwijl je over een paar jaar misschien geen electriciteit meer verbruikt, omdat je je fabriek sluit of verhuist. Het electriciteitsbedrijf zit dan met een te zware installatie, waar nog lang de kosten niet zijn uitgehaald.

Teneinde een beetje thuis te raken in de gewone eenheden van de electriciteit zullen we eens bekijken, hoe in grote trekken electriciteit wordt gedistribueerd. De opwekking geschiedt met behulp van machines, die draaistroom leveren. Draaistroom is niets anders dan een bijzondere schakeling van wisselstromen. Hoe zo'n machine precies werkt zullen wij later nagaan. Op het ogenblik is het alleen van belang te weten, dat wanneer een spoel in een magnetisch veld wordt gewenteld aan de klemmen van de spoel een wisselspanning ontstaat. In een draaistroomgenerator zitten in principe drie spoelen, die 120° „uit elkaar liggen". In elke spoel wordt een normale wisselspanning opgewekt; alleen bereiken de spanningen van de drie spoelen niet op hetzelfde ogenblik hun maximum-, minimum- en nulwaarden. Dit is nl. afhankelijk van hun stand in het veld, en daar zij 120° na elkaar dezelfde stand innemen zullen de drie wisselspanningen, die in de spoelen worden opgewekt ook 120° na elkaar ontstaan. Als je aanneemt, dat een omwenteling van een spoel één periode van de wisselspanning oplevert, zul je misschien inzien, dat de spanningen van de andere twee spoelen 120° van de 360 in één periode later ontstaan.

Men zou nu de uiteinden der drie spoelen naar buiten kunnen

van fig. 21, dan zie je, dat het geleverde vermogen overeenkomt met een stroom I_w en dat deze stroom kleiner is dan de stroom, die je werkelijk uit het net trekt: I_{net}. De vraag is nu waarvoor je betaalt, voor een zekere geleverde stroom of voor een bepaald geleverd vermogen. Aangezien het doel van de electriciteitslevering is vermogen te leveren is het logisch, dat je betaalt voor een hoeveelheid geleverd vermogen (waarbij natuurlijk ook rekening moet worden gehouden met de tijd gedurende welke je dat vermogen opneemt). Je betaalt dus evenveel, of je nu een stroom I_w in fase met de spanning opneemt, of een stroom I_{net} onder een hoek φ in fase met de spanning verschoven. Deze grote stroom echter verplicht de leverancier van electriciteit zijn machines en vooral zijn kabels zwaarder uit te voeren. Dat kan natuurlijk wel, maar daar zul je dan voor moeten betalen. Vandaar dat de electriciteitsbedrijven bezwaar maken tegen een slechte cos φ tenzij je daar extra voor betalen wilt.

Heb je nu een bedrijf, waarin de cos φ variabel is, dan kun je wel zeggen: ik zal zorgen, dat ik mijn machines zo instel, dat mijn cos φ niet te slecht wordt. Goed zegt het electriciteitsbedrijf, maar dan wil ik dat wel eens controleren; ik plaats een „minimum-cos φ-meter" naast je electriciteitsmeter. Aan het einde van de maand kijkt men dan niet alleen hoeveel kilowatturen je hebt verbruikt, maar ook hoe groot je kleinste cos φ gedurende de maand was. Was die klein, dan betaal je een hoger tarief. Was die betrekkelijk hoog, dan heb je goed je best gedaan en hoef je maar weinig per kWh te betalen.

Wanneer je nu een electrisch klokje hebt en de cos φ van het motortje blijkt erg slecht te zijn, b.v. cos $\varphi = 0{,}2$, dan hoef je niet te denken, dat je een hoger tarief zult krijgen! De grootte van de stroom is verwaarloosbaar klein t.o.v. de stromen opgenomen door alle gloeilampen in je huis. En als de *totale* cos φ in het net maar niet te slecht is kan het de electriciteitsmaatschappij niets schelen, wat er verder gebeurt. Gaat het echter om grote installaties, dan wordt het belangrijk. Als afnemer van electriciteit ga je dan eens denken of je een slechte cos φ niet kunt verbeteren, want dat scheelt je aanmerkelijk in de electriciteitsrekeningen.

Welnu, de oplossing is natuurlijk een batterij condensatoren. Het bezwaar is wel, dat het gaat om vrij grote stromen, want cos φ-verbetering is alleen van belang voor grotere installaties. Een batterij

faseverschuiving. In fig. 21 is nog eens een diagram getekend voor een geval, waarbij uit een net een stroom onder een zekere faseverschuiving wordt opgenomen. Van groot belang is nu te weten, welk vermogen uit het net wordt opgenomen. Zoals je weet is bij gelijkstroom het opgenomen vermogen in watts gemakkelijk uit te rekenen, door de spanning van het net met de opgenomen stroom te vermenigvuldigen. Bij wisselstroom mag men dit niet zonder meer doen. De vector I_{net} in fig. 21 kun je ontbinden in twee componenten, een die in dezelfde richting als de spanning werkt en een die daar loodrecht op staat. Alleen de component I_w nu werkt mee voor het leveren van vermogen, omdat alleen dat deel van de stroom, dat met de spanning meewerkt vermogen kan leveren. Daar je bij gelijkstroom geen rekening hebt te houden met faseverschuiving kun je de stroom eenvoudig met de spanning vermenigvuldigen. Bij wisselstroom kun je het vermogen alleen vinden door de component I_W (de zgn. wattcomponent) van de totale stroom met de spanning te vermenigvuldigen. In fig. 21 is daarom het vermogen niet $I_{net} \times V_{net}$, maar wel $I_w \times V_{net}$. De andere component, die de watt-loze component wordt genoemd werkt niet mee aan het leveren van vermogen.

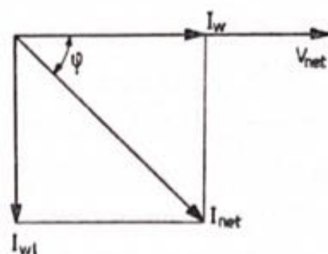


Fig. 21

Wanneer je iets van goniometrie afweet zul je begrijpen dat $I_w = I_{net}$ maal de cosinus van de faseverschuivingshoek φ. Hieruit volgt dat in het algemeen in de wisselstroomtechniek $W = V_{net} \cdot I_{net} \cdot \cos \varphi$. De $\cos \varphi$ kan een waarde hebben variërende van 0 tot 1. Is $\cos \varphi = 1$, dan wil dat zeggen, dat $\varphi = 0°$. Er is dan geen faseverschuiving. Dat geval doet zich dus voor bij een zuiver ohmse weerstand. Zo kun je een gloeilamp als een zuivere weerstand beschouwen. Voor het vermogen van een gloeilamp kun je dus wel E maal I nemen. Ook voor verwarmingselementen, zoals kachels, keteltjes, enz. is de faseverschuiving nul. Bij motoren en toestellen, die transformatoren bevatten, b.v. een radiotoestel, is $\cos \varphi$ kleiner dan 1.

Wat kan nu het bezwaar zijn van een lage $\cos \varphi$ en waarom spreekt men dan van een „slechte" $\cos \varphi$? Bekijk je nog het diagram

welke in de spoelen ontstaan. Let dus wel: de vectoren stellen spanningen voor, die in verschillende geleiders ontstaan! Alleen hun onderlinge ligging is juist. Wanneer nu de gekoppelde spanning wordt genomen, dan ontstaat deze uit twee spanningen. Nemen we aan, dat zij ontstaat uit V_1 en V_2, dan kunnen we natuurlijk V_1 en V_2 niet gewoon bij elkaar optellen, omdat beide spanningen niet in fase zijn; de optelling moet weer vectorieel geschieden.

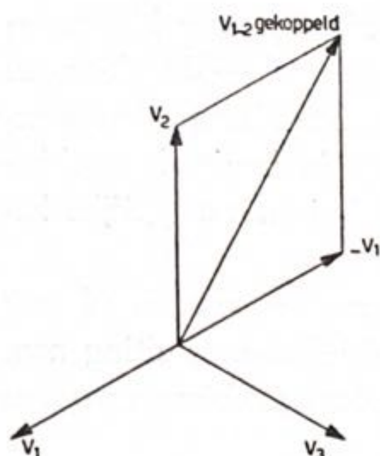


Fig. 24

Uit de grafieken van fig. 23 blijkt, dat wanneer op een ogenblik een der drie spanningen haar maximumwaarde (positieve) bereikt, beide andere spanningen steeds negatief zijn. Nemen we dus aan, dat op een bepaald ogenblik V_2 zijn maximale waarde heeft bereikt, en dat we de gekoppelde spanning tussen V_2 en V_1 willen weten, dan moeten we dus niet nemen $V_1 \hat{+} V_2$ ($\hat{+}$ betekent „vectoriële optelling"), maar $V_2 \hat{-} V_1$, omdat we hebben aangenomen, dat V_2 maximaal positief was. Vectorieel aftrekken is volgens afspraak niets anders dan vectorieel optellen met een tegengesteld gerichte, maar overigens gelijke vector. We stellen dus de vector V_2 niet samen met V_1, want dat zou een optelling betekenen, maar we stellen V_2 samen met een vector, die tegengesteld is aan V_1, maar overigens gelijk van lengte.

Een eenvoudig meetkundesommetje zal je leren, dat je dan evengoed dat verschil kunt vinden door de lijn te trekken, die de pijlpunten van de af te trekken vectoren verbindt. Zo is in fig. 25 eenvoudig een lijn getrokken van de punt van V_1 naar die van V_2 en deze lijn, die weer een vector is geeft aan de grootte van de gekoppelde spanning, ontstaan door V_1 en V_2 en tevens haar richting (een vector in een diagram hoeft niet altijd door de oorsprong te gaan!). Het vaststellen van de lengte van de vector, die de gekoppelde spanning aangeeft is weer eenvoudige meetkunde, want als je een hulplijntje trekt, ontstaan twee driehoeken met hoeken van 60°; zoals je misschien weet is de lange rechthoekszijde dan

omdat dit de spanning is van een van de drie spoelen en de spoelen gelijk zijn. Men noemt deze spanning de fase-spanning, omdat men spreekt van de drie fasen van de draaistroom.

De kabel met de drie fasedraden en de nulleider wordt nu onder de straat gelegd en voor elke woning wordt een aftakking gemaakt: men voert de nulleider en een van de fasedraden naar binnen en op deze eenfase-aansluiting wordt het huis gevoed — dus door een van de drie spoelen van de generator. Daar men alle spoelen ongeveer gelijkmatig moet belasten omdat anders de draaiende machine gaat slingeren, worden ongeveer evenveel huizen van gelijke belastingen op de drie fasen aangesloten.

Voor kracht-aansluitingen, die motoren moeten voeden of zeer grote woningen, legt men toch nog een driefase-aansluiting aan, waarbij dus de drie fasedraden en de nulleider naar binnen worden gevoerd.

De driefasespanning van fig. 23 zal, wanneer men een gelijkmatige belasting van de drie faseleidingen toepast, een driefasestroom opleveren, waarvan de grafiek dezelfde vorm heeft als die van de spanning in fig. 23. Elke grafiek geeft van ogenblik tot ogenblik de waarde van de spanning aan (respectievelijk de stroom door) een der fasedraden. Tellen wij van ogenblik tot ogenblik de momentele waarden van de drie stromen op, dan krijgen wij de momentele waarden van de stroom door de gemeenschappelijke nulleider. Deze blijkt dan steeds nul te zijn (vandaar de naam nulleider!). Het zal je daarom niet zo verbazen, dat soms de nulleider geheel wordt weggelaten, nl. wanneer zekerheid bestaat, dat de drie fasen gelijkmatig zullen worden belast. Dit kan b.v. het geval zijn met een motor, waarvan de constructie weer, net als die van de generator, symmetrisch is. Het zal je ook niet verbazen, dat de nulleider meestal dunner is dan de fasedraden, omdat de stroom, die er door vloeit, bij zoveel mogelijk gelijkmatige belasting van de fasen, aanmerkelijk kleiner blijft dan de fasestromen.

Van belang is te weten welk verband er bestaat tussen de fasespanning en de gekoppelde spanning. Daartoe tekenen wij een vectordiagram van de spanningen in de drie spoelen van de generator. In fig. 24 is dit gedaan en daarin zie je drie pijlen getekend, die 120° uit elkaar liggen. Deze stellen voor de drie spanningen,

voeren en als het ware drie afzonderlijke netten kunnen vormen, die niets met elkaar te maken hebben. Dit doet men natuurlijk niet, omdat dan het voordeel van draaistroom verloren gaat en dat is: met zo dun mogelijke geleiders zoveel mogelijk energie overbrengen. Het bijzondere van de draaistroom zit 'm juist in de speciale schakelingen, die men met de spoelen van de generator tot stand kan brengen. In fig. 22 is een dergelijke schakeling getekend. Er zijn drie spoelen, waarvan één uiteinde telkens verbonden is met een gemeenschappelijk punt, het zgn. sterpunt. De andere uiteinden van de drie spoelen zijn met een der geleiders van de draaistroomkabel verbonden.

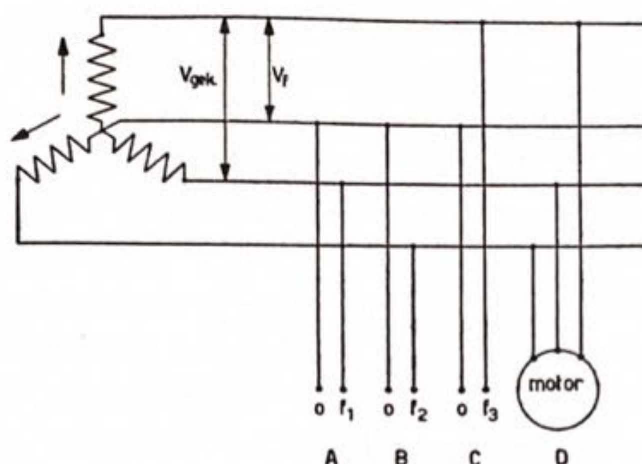
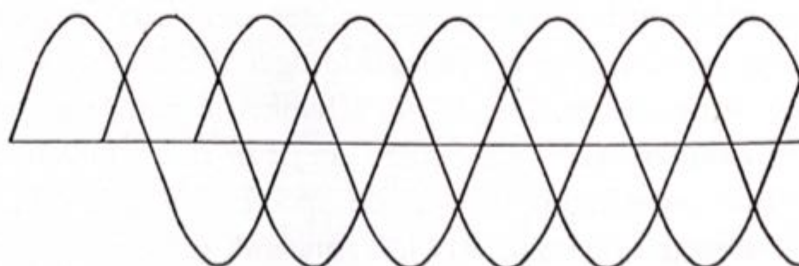


Fig. 22

De generator levert een gecombineerde wisselstroom op, die in fig. 23 grafisch is voorgesteld. Deze wisselspanning ontstaat dus in de vier aders van het net en niet in één! We kunnen nu twee verschillende spanningen onderscheiden. De spanning tussen twee fasedraden, dat zijn de draden, die met de uiteinden der spoelen zijn verbonden, is voor de drie mogelijke combinaties gelijk; men noemt deze spanning de gekoppelde spanning, omdat zij steeds ontstaat uit de „ koppeling " van twee spanningen (er zijn nl. altijd twee spoelen), die tussen twee fasedraden geschakeld staan.


Fig. 23

De spanning tussen één fasedraad en de nulleider (dat is de draad, verbonden met het sterpunt) is ook voor de drie gevallen dezelfde,

HOOFDSTUK II

Electrische machines: Opwekking van wisselstroom - opwekking van gelijkstroom - dynamo's - karakteristieken - asynchrone motoren - synchrone motoren - collectormotoren - speciale wisselstroommotoren - motor-generatoren - eenanker-omvormers - transformatoren.

Onder de electrische machines vallen de electromotoren, de generatoren of dynamo's en de machine-omvormers, zoals de motorgeneratoren en de een-anker-omvormers.

Het principe van de motor berust op de kracht, die een stroomvoerende geleider in een magnetisch veld ondervindt. Door geleiders zodanig te groeperen, dat verscheidene krachten samenwerken kan men een draaiend koppel krijgen. In fig. 26 is bijvoorbeeld een winding voorgesteld, die zich in een magnetisch veld bevindt, terwijl door de winding een stroom vloeit. Vloeit de stroom in de bovenste windingszijde in de tekening naar rechts, dan zal hij vanzelf in de onderste windingszijde naar links vloeien. Uit de doorsnede van de winding in het magnetisch veld is dan duidelijk te zien, dat er twee krachten K_1 en K_2 ontstaan, die samenwerken tot het vormen van een rechtsom draaiend koppel. Door de stroomdoorgang zal de winding dus rechtsom gaan draaien. Deze draaiing zal echter spoedig eindigen. Is de winding nl. een kwart slag verder gedraaid, dan zullen de krachten K_1 en K_2, die steeds in dezelfde richtingen blijven werken, niet meer meewerken aan het vormen van een draaiend koppel. Zij trachten alleen nog de winding uit elkaar te trekken. Zou de winding eventueel door eigen traagheid over dit punt heen kunnen draaien, dan zal zij spoedig worden afgeremd, omdat vanaf

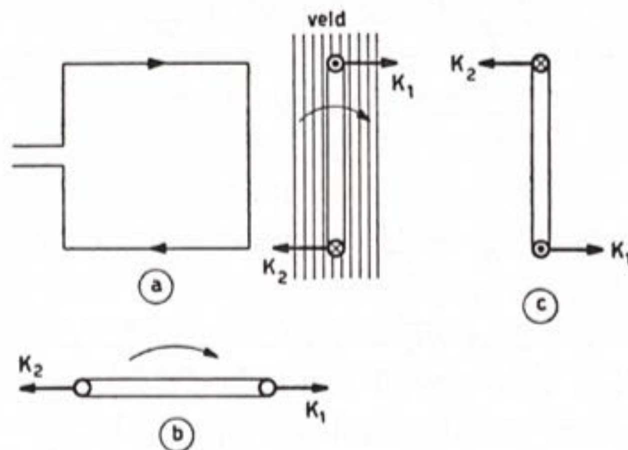


Fig. 26

Voorlopig moet je dus alleen onthouden:

1. Een wisselstroom is een stroom, die periodiek van richting verandert; de meest gebruikte vorm van wisselstromen is de sinusvormige wisselstroom.
2. De momentele waarde is de waarde van de stroom of spanning op een bepaald ogenblik.
3. De amplitude van een wisselstroom is de grootste momentele waarde, die in een periode optreedt.
4. De periode is de tijd, die verloopt tussen twee gelijke momentele waarden, waarbij de stroom in dezelfde richting verandert.
5. De effectieve waarde van een wisselstroom is de waarde van een denkbeeldige gelijkstroom, die in dezelfde tijd dezelfde energie levert. Voor een sinusvormige wisselstroom is de effectieve waarde $\frac{1}{2}\sqrt{2}$ maal de amplitude.
6. De gemiddelde waarde van een wisselstroom is het gemiddelde van alle momentele waarden, gedurende één periode, waarbij alle momentele waarden positief worden gerekend, ook al zijn zij negatief. Voor een sinusvormige wisselstroom is de gemiddelde waarde gelijk aan $2/\pi$ maal de amplitude.
7. De frequentie van een wisselstroom is het aantal perioden per seconde. In de meeste landen van de wereld wordt 50 Hz gebruikt.
8. De gekoppelde spanning in een draaistroomnet is de spanning tussen twee fasedraden. De fasespanning is de spanning tussen een fasedraad en de nulleider. Bij een sterschakeling is de gekoppelde spanning gelijk aan $\sqrt{3}$ maal de fasespanning.
9. Een capaciteit laat schijnbaar een wisselstroom door. De stroom is 90° voorijlend t.o.v. de spanning.
10. Een zelfinductie laat schijnbaar een wisselstroom door. De stroom is 90° naijlend bij de spanning.

$\frac{1}{2}\sqrt{3}$ maal de schuine zijde. De totale vector is dus $V_1\sqrt{3}$ of wat hetzelfde is $V_2\sqrt{3}$. De fasespanningen zijn nl. gelijk.

Blijkbaar is de gekoppelde spanning in een draaistroomleiding, die in ster is geschakeld, zoals is aangegeven in fig. 22 gelijk aan $\sqrt{3}$ maal de fasespanning. Als fasespanning heeft men nu meestal 220 Volt. De daarbij behorende gekoppelde spanning is 380 V. Zo spreekt men van een net met een spanning 220/380. Deze notitie is gewoonlijk ook gebruikt voor het aangeven van de spanning op draaistroommotoren. In Den Haag had men vroeger een spanning van 220 als gekoppelde spanning. De daarbij behorende fasespanning, die je dus ook in de huizen aantrof was 127 V. De spanning van het net heeft men iets verhoogd, waardoor de netspanning nu 130/225 V is.

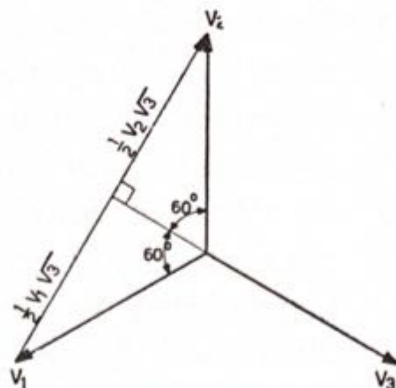


Fig. 25

Nadat je enig inzicht hebt gekregen hoe de electriciteit je huis binnenkomt zul je beter begrijpen, waarom men onderscheidt de nuldraad en de fasedraad. De nuldraad is practisch altijd geaard.

Je kent misschien het grapje, waarbij gevraagd wordt: hoe kan ik een hogere spanning krijgen dan 220 V? Antwoord: door twee stopcontacten in serie te schakelen! Inderdaad zou dat met een beetje geluk kunnen. Je zou dan toevallig een huis moeten hebben met drie (soms zijn er twee) fasen, waarbij je twee stopcontacten (wandcontactdozen heten die dingen officieel) neemt die op twee verschillende fasen zijn aangesloten. Je zou dan een draad van één pool van het ene contact naar één pool van het andere moeten laten lopen. Als je geluk hebt verbind je net de twee nuldraadaansluitingen met elkaar (heb je pech, dan smelt een zekering door!). Met de twee overblijvende polen (een van iedere doos) krijg je een hogere spanning, nl. de gekoppelde: 380 V. Wie gedacht had 440 V te krijgen zal wel raar opkijken! De verbinding van de nuldraadaansluitingen kun je nog weglaten ook! Wij komen op deze draaistroomnetten terug.

geschakeld hebben zal het koppel niet langer afnemen, maar integendeel toenemen, totdat het maximaal is, dat is wanneer spoel 4 in de stand is gekomen, waarin nu spoel 1 in de figuur is getekend. Deze omschakeling van spoelen gaat steeds door, zodat wij doorlopend met een betrekkelijk sterk koppel werken en geen electrische energie sturen in spoelen, die toch geen of een zeer klein koppel leveren.

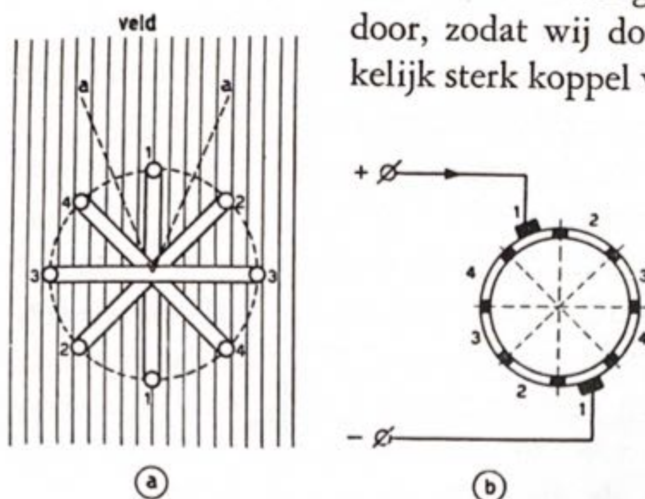


Fig. 29

De omschakeling kan tot stand komen met een collector, die evenveel lamellen heeft als er uiteinden van spoelen zijn, dus in dit geval 8 lamellen. Men zorgt ervoor, dat normaal maar één paar lamellen onder de borstels staan, in fig. 29b zijn dat voor spoel 1 de twee lamellen 1. Bij het draaien van de motor zullen de lamellen 1 verder draaien en de lamellen 4 onder de borstels komen. Bij de overgang zullen de borstels een tijdlang elk twee lamellen tegelijk raken, zodat gedurende de overgang stroom vloeit door twee spoelen.

Voor de opwekking van het veld dient een magneet. Het is duidelijk, dat een zo klein mogelijke luchtweg tussen de polen van de magneet een zo sterk mogelijk veld tot gevolg zal hebben. In deze luchtweg moeten echter de spoelen draaien, zodat er toch minimale afmetingen van de „luchtspleet" nodig zijn. Men wil natuurlijk een zo sterk mogelijk veld, omdat het koppel van de motor evenredig is met het veld ($K = 0{,}1\ B.I.l$). Men zou nu binnen de spoelen een kern kunnen opnemen, die overigens niet met de spoelen zou behoeven mee te draaien. Tussen deze kern en de magneetpolen zou men alleen nog zoveel ruimte behoeven over te laten, dat de spoelzijden vrij zouden kunnen draaien. Deze luchtspleten tussen kern en magneetpolen zijn evenwel nog te groot, zodat men ook ijzer tussen de spoelzijden plaatst. Er ontstaat dan een constructie, waarbij de spoelzijden in gleuven van een ijzeren kern

De spoel wordt dus gedraaid onder invloed van twee krachten, die op beide spoelzijden werken en samen een koppel vormen.

In de tweede plaats zal men in werkelijkheid niet met één spoel werken, omdat het koppel dan niet constant zou zijn. Immers alleen in de standen, waarbij het vlak van de spoel samenvalt met de richting van het veld zullen de krachten geheel samenwerken tot het vormen van een koppel. In een tussengelegen stand, zoals b.v. in fig. 28 is getekend werkt de kracht K_1 van de bovenste spoelzijde slechts gedeeltelijk mee tot het vormen van het koppel. K_1 kan worden ontbonden in een kracht K_1', die loodrecht staat op de arm van het koppel en een kracht K_1'', die in de richting van de arm werkt en niet helpt om de spoel te draaien. Je begrijpt, dat K_1' kleiner is dan de beschikbare kracht K_1 en dat K_1' steeds kleiner wordt naarmate de spoel verder draait. Tenslotte wanneer de spoel zijn vlak loodrecht op de richting van het veld heeft zal $K_1' = 0$ geworden zijn en werkt op de spoel, zoals wij reeds hebben gezien geen koppel.

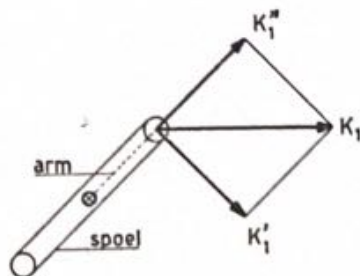


Fig. 28

Om nu te zorgen, dat op de as van de motor een gelijkmatiger koppel werkt gebruikt men verscheidene spoelen, die gelijkmatig over de omtrek van het draaiend deel van de motor, de zgn. rotor, verdeeld zijn. In fig. 29a zie je b.v. 4 spoelen. Het is duidelijk, de richting van het veld in aanmerking genomen, dat b.v. spoel 3 geen koppel zal ondervinden. Daarentegen zal spoel 1 een sterk koppel krijgen. De spoelen 2 en 4 ondergaan ieder een koppel, dat geringer is dan dat van spoel 1. Het is nu de bedoeling, dat alleen spoel 1 aangesloten is en wel tussen de getekende grenzen a-a. Zodra de rotor verder draait zal het koppel op spoel 1, dus het koppel van de motor (want alleen spoel 1 is werkzaam) kleiner worden. Dit gaat zo door totdat spoel 1 de rechter grens a bereikt. Spoel 1 wordt dan afgeschakeld en spoel 4 wordt daarvoor in de plaats aangesloten. Op het ogenblik, dat spoel 1 de rechter grens a heeft bereikt heeft spoel 4 juist de linker grens a bereikt en is het koppel van spoel 4 juist gelijk aan dat van spoel 1. Zouden wij verder gaan met spoel 1, dan werd het koppel steeds kleiner, maar nu wij op spoel 4 over-

het in fig. 26b getekende moment de krachten op de windingszijden een nieuw draaiend koppel gaan veroorzaken, dat de winding juist in de andere richting tracht te laten draaien. Zou de winding dan ook nog een kwart omwenteling verder kunnen draaien, dan zou de stand van fig. 26c ontstaan.

Het is duidelijk, dat de krachten steeds in dezelfde richting blijven werken, omdat de stroomrichting in de windingszijden niet verandert, terwijl ook de richting van het veld constant is. Zou men dus de stroomrichting van tijd tot tijd kunnen veranderen, dan zou het lukken de winding te laten draaien. Dit omkeren van de stroom is mogelijk met behulp van een zgn. commutator (omschakelaar). Deze bestaat in principe uit twee geïsoleerde koperen platen, die op een houder van isolatiemateriaal gemonteerd zijn. De koperen platen noemt men de lamellen van de collector.

De lamellen zijn verbonden met de uiteinden van de winding door middel van verbindingen (zie tekening fig. 27) die met de winding meedraaien. De verbinding van de collector met de polen van het voedende net geschiedt door middel van borstels van koolstof, waaronder de lamellen draaien. Het is nu duidelijk dat wanneer de winding een halve slag verder gedraaid is, de stroomrichting in de windingszijden is omgekeerd.

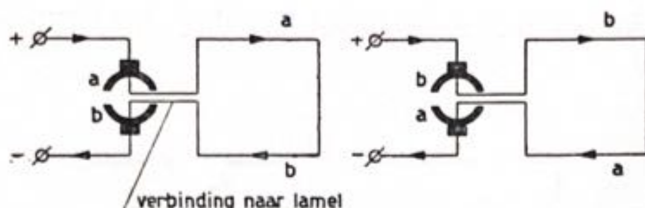


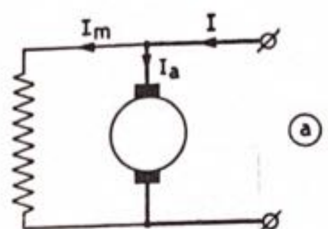
Fig. 27

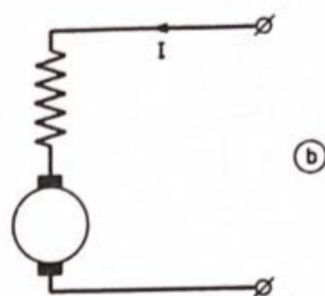
Wanneer wij even aannemen, dat de winding in de middenstand (fig. 26b) zoveel massa heeft dat zij, zonder dat er een koppel werkt, doordraait, dan zie je in, dat de winding met collector van fig. 27 zal blijven draaien.

In werkelijkheid zal men beginnen niet één winding te nemen, maar een spoel met verscheidene windingen. De spoel heeft dan twee spoelzijden met ieder evenveel draden. In de draden van een spoelzijde gaan de stromen in dezelfde richting. De krachten, die op de draden van een spoelzijde werken zullen dus samenwerken en tezamen één kracht vormen, die op de hele spoelzijde werkt.

ken, die nodig is voor het verkrijgen van het gewenste koppel. Op de poolkernen worden dan de zgn. veldwikkelingen gemonteerd.

In fig. 31 zijn nu enkele mogelijke schakelingen getekend voor gelijkstroommotoren. De veldwikkelingen (die op zichzelf in serie of parallel, of een combinatie daarvan, zijn geschakeld) kunnen parallel geschakeld worden aan de rotor (het anker). Er ontstaat dan een zgn. shuntmotor (fig. 31a). De veldwikkeling kan in serie met het anker worden geschakeld (fig. 31b); men spreekt dan van een seriemotor. Tenslotte kan men het veld opwekken met verscheidene spoelen, waarvan enkele in serie met het anker staan geschakeld en andere parallel ermede. In dit laatste geval (fig. 31c) spreekt men van een compoundmotor.





Het is duidelijk, dat de motoren verschillende eigenschappen hebben. Zo zal bij de seriemotor de sterkte van het veld toenemen wanneer de stroom door het anker toeneemt. Dit is weer niet het geval bij de shuntmotor, waar de sterkte van het veld (de stroom I_m bepaalt deze sterkte) uitsluitend afhankelijk is van de netspanning. We komen later terug op de gevolgen hiervan.

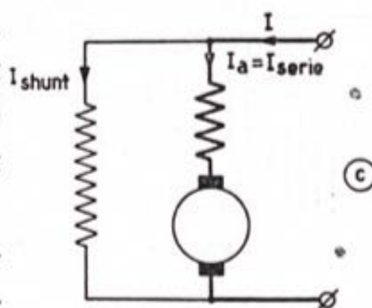


Fig. 31

Bij een dynamo heeft men in principe ook een wikkeling, die tussen de polen van een magneet geplaatst is. De wikkeling wordt aan het draaien gebracht. In fig. 32 is dit voorgesteld. Uit de figuur blijkt ook, dat elke dynamo in eerste instantie een wisselspanningsbron is. Vergelijk je nl. de figuren a en b, die twee standen van de winding voorstellen, die 180° verschillen, dan zie je direct dat de opgewekte e.m.k. in de winding is omgekeerd en daarmede dus de polariteit aan de klemmen van de dynamo. Daar de opgewekte spanning in

stromen is, de richting van het veld in aanmerking genomen, zodanig, dat het vlak van de ronddraaiende stromen evenwijdig is aan de as van de rotor. In principe is er immers geen verschil tussen het induceren van de e.m.k.'s in het ijzer of in de spoelen. De wervelstromen hebben in de eerste plaats als nadeel, dat het ijzer van de rotor wordt verwarmd, terwijl in de tweede plaats dit energieverlies betekent. Het is dus zaak de wervelstromen tegen te gaan. Dit is mogelijk door het ijzer te „lamelleren". De rotor wordt daarom opgebouwd uit plaatjes (die men blikken noemt), die dezelfde vorm hebben als de dwarsdoorsnede van de rotor. De blikken worden gestansd met gleuven en een opening in het midden voor het doorlaten van de rotoras, eventueel met een spiebaan. Het stansen geschiedt natuurlijk zo nauwkeurig, dat de blikken achteraf precies op elkaar passen.

De blikken worden van elkaar geïsoleerd door middel van lak, papierlagen (zeer dun) of door een of beide zijden te laten roesten. IJzerroest geleidt nl. geen electriciteit. We krijgen dus een rotor, die bestaat uit blikken, die van elkaar zijn geïsoleerd en wel juist in die richting, waarin de wervelstromen zouden willen vloeien. De dikte van de blikken varieert, maar ligt toch in de grootte-orde van enkele tienden millimeters.

Bekijk je nu nog eens fig. 30a dan zul je zien, dat de einden der polen, de zgn. poolschoenen, ook gelamelleerd moeten zijn. Dicht bij de poolschoenen draaien nl. de spoelzijden, waar een electrische stroom doorgaat. Rondom de spoelzijden zal dus een magnetisch veld bestaan (juist op die ogenblikken, dat de spoelzijden onder de polen doordraaien). Dit magnetisch veld draait mee met de spoelzijde, zodat in de poolschoenen wervelstromen zouden worden opgewekt, wanneer zij niet gelamelleerd werden. Soms maakt men de polen en poolschoenen uit één stuk, waarbij dus ook de polen uit blikken zijn opgebouwd. Soms bouwt men alleen de poolschoenen uit blikken op en maakt men de polen uit massief weekijzer.

De opwekking van het magnetisch veld, waarin de rotor draait dient te geschieden met behulp van een magneet. In enkele gevallen maakt men daarbij gebruik van een permanente magneet, doch dat blijft toch beperkt tot zeer kleine motoren. Meestal zal men gebruik moeten maken van een electromagneet om die veldsterkte te berei-

liggen. In fig. 30a is dit voor één der spoelen getekend. Er zijn dus in eerste instantie evenveel gleuven in de kern als er spoelzijden zijn. De gleuven kunnen verschillende vormen krijgen. In fig. 30b is een drietal principieel verschillende vormen getekend. In de eerste plaats de rechthoekige gleuf, die ook in fig. 30a is getekend. Deze vorm heeft twee bezwaren. In de eerste plaats zal de bevestiging van de spoelen in de gleuven niet gemakkelijk zijn. De bevestiging moet evenwel stevig zijn, want door de grote snelheid van de rotor zullen de spoelzijden door de middelpuntvliedende kracht naar buiten getrokken worden. In de tweede plaats kan men de luchtweg tussen magneetpolen en kern nog meer verminderen. Daartoe neemt men de V-vormige gleuf. In deze gleuf is het mogelijk de spoelzijde aan te brengen en daarna vast te zetten met behulp van een houten spie (fig. 30c). Men neemt hout, om de isolatie van de windingen niet tijdens het inslaan van de spie te beschadigen. Doordat de spie onmogelijk uit de gleuf kan raken door de middelpuntvliedende kracht zal ook de spoelzijde op haar plaats blijven. De krachtlijnen van het magnetisch veld kunnen nu gemakkelijker van de magneetpool in het ijzer van de rotor komen, daar slechts op een zeer klein deel van de omtrek

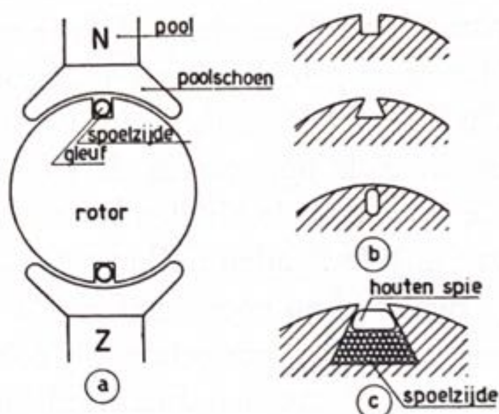


Fig. 30

geen ijzer is. Naar binnen toe wordt de gleuf dan wel breder, maar dat heeft alleen maar een verhoging van de inductie ter plaatse tot gevolg, hetgeen mogelijk is, als men geen te grote verzadiging van het ijzer toelaat. Tenslotte is in fig. 30b nog de geheel gesloten gleuf getekend. Het bezwaar van deze gleufconstructie is dat het inbrengen van de spoelzijden niet gemakkelijk is. Zij kunnen niet meer van buiten uit in de gleuf zakken, maar moeten er doorheen gestoken worden. Dit maakt de fabricage moeilijker, dus duurder.

De kern, die natuurlijk van ijzer is, draait nu met grote snelheid in het magnetisch veld en het is duidelijk, dat in het ijzer wervelstromen zullen worden geïnduceerd. De richting van deze wervel-

veroorzaakt, die van ons af gericht is (dit is in de spoelzijden voorgesteld door het aangeven van een kruisje). In de andere spoelzijden, die onder de Z-pool draaien zullen de stromen naar ons toe gericht zijn (punt in de spoelzijde). Je moet er vooral goed op letten, dat hier vier spoelen, dus met acht uiteinden aan slechts vier lamellen van de collector zijn verbonden. Dit is mogelijk, omdat de spoelen twee aan twee parallel geschakeld zijn, zoals uit fig. 34 duidelijk blijkt. De spanningskromme komt dus overeen met het geval, dat er maar twee spoelen zijn, maar het voordeel van de vier spoelen is, dat door iedere spoel nu maar de helft van de totaal afgenomen stroom behoeft te gaan. Verder zul je uit de tekening gemakkelijk kunnen nagaan, dat de spoelen alleen dan gebruikt worden (doordat de koolborstels met de desbetreffende lamellen zijn verbonden) wanneer zij een gunstige e.m.k. geven, dat is, wanneer zij onder de polen doordraaien.

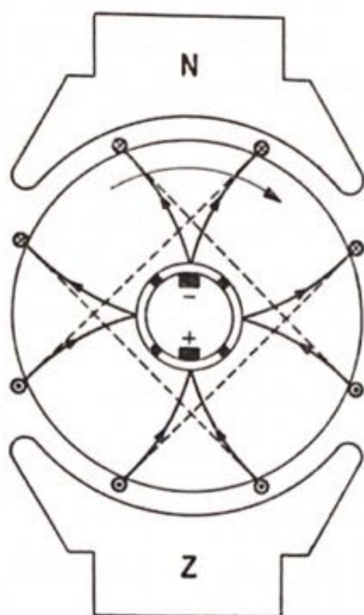


Fig. 34

Het parallelschakelen van spoelen geschiedt ook bij motoren.

Neem je meer dan twee spoelen, b.v. vier of vier stellen, die telkens parallel geschakeld zijn, dan heb je natuurlijk totaal acht lamellen nodig bij de tweepolige machine, die in fig. 34 wordt verondersteld, en dan kun je een nog regelmatiger kromme van de afgegeven stroom krijgen. In fig. 33c is dit voor vier spoelen voorgesteld. Tevens blijkt, dat door het optellen van de spanningen de totale spanning hoger wordt! Hoewel men in werkelijkheid veel meer spoelen neemt moet je dus toch bedenken, dat de gelijkstroom, die afgegeven wordt door een dynamo nooit zuivere gelijkstroom is, maar altijd een *rimpel* vertoont.

Machines voor vermogens groter dan 1 kW worden met meer polen uitgevoerd. Zo zie je in fig. 35 een vierpolige gelijkstroommachine schetsmatig voorgesteld. Het aantal polen moet natuurlijk altijd even zijn, omdat voor elke N-pool een Z-pool moet zijn.

dynamo's in het algemeen geldt, wat voor de motoren gezegd werd, dat b.v. de wikkeling op een ijzeren kern moet worden geplaatst, dat deze kern gelamelleerd moet zijn, dat men verscheidene wikkelingen moet nemen, enz.

Indien wij nu gelijkstroom wensen, in plaats van wisselstroom, dan zal het weer noodzakelijk zijn, dat we de stroom commuteren, hetgeen met een commutator kan geschieden. Zodra dan de e.m.k. in de wikkeling van richting wil veranderen, wordt de polariteit van de wikkeling omgeschakeld en in plaats van een negatieve halve periode van de wisselstroom volgt een nieuwe positieve halve periode. De afgegeven stroom heeft dan een grafiek, zoals in fig. 33a is weergegeven. Dit is allerminst een zuivere gelijkstroom; de pulsatie is nog veel te groot. Door nu méér dan een spoel te nemen, b.v. twee, loodrecht op elkaar staande spoelen, kan men een gelijkmatiger e.m.k. krijgen. Dit is in fig. 33b voorgesteld. Hiervan is in fig. 34 een schets gemaakt. Schematisch is in deze figuur een zij-aanzicht voorgesteld van de rotor. Op deze rotor zijn niet twee maar vier spoelen geplaatst. Zij zijn zodanig geplaatst en geschakeld aan de collector, dat zij steeds twee aan twee samenwerken. Als je de draairichting van de rotor in aanmerking neemt en de richting van het veld, zul je gemakkelijk inzien, dat in de spoelzijden, die onder de N-pool draaien de e.m.k. een stroom

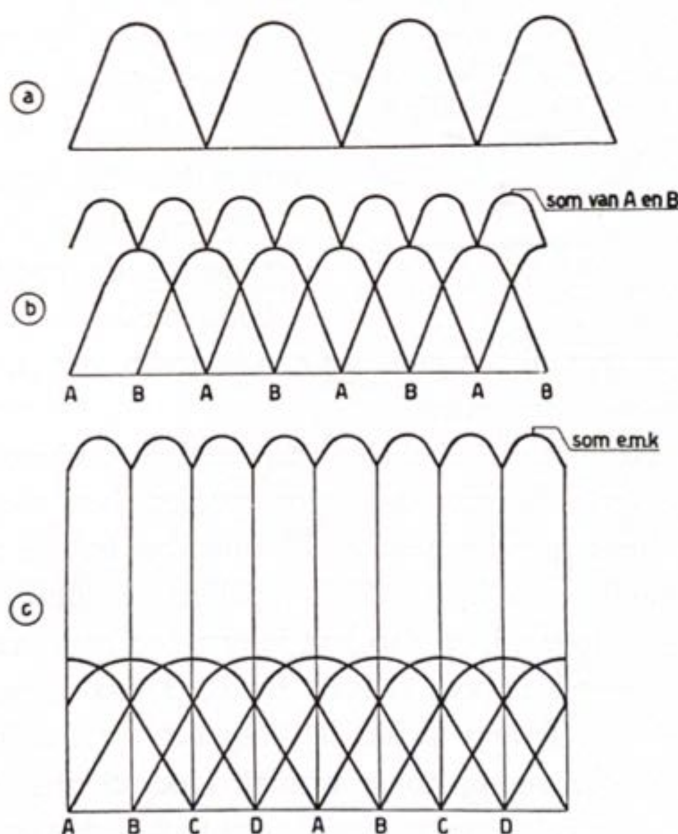


Fig. 33

de windingszijde afhangt van de snelheid waarmede de windingszijde zich *loodrecht op het veld* beweegt, neemt de e.m.k. af naarmate de winding meer krachtlijnen gaat omvatten. In fig. 32c zal in stand I van de winding de maximale e.m.k. worden opgewekt; de snelheid loodrecht op het veld is daar gelijk aan de werkelijke omtreksnelheid van de windingszijde. In stand II b.v. is de snelheid loodrecht op het veld nog maar gelijk aan de component v_1 van de snelheid v. Deze component wordt steeds kleiner, naarmate de spoelzijde verder draait. In stand II van de winding zal de opgewekte e.m.k. nul zijn. Daar de opgewekte e.m.k. te allen tijde evenredig is aan de component v_1 en verder van constante grootheden afhangt (lengte van de windingszijden, veldsterkte) zal de opgewekte e.m.k. evenredig aan v_1 zijn. Nu is $v_1 = v \sin \alpha$, terwijl v zelf wel constant is, omdat de winding met constante snelheid ronddraait. Dus zal de e.m.k. sinusvormig zijn, nl. evenredig aan sin α, waarbij de hoek α de door de winding doorlopen hoek voorstelt, gerekend vanaf een bepaald punt, in de figuur gerekend vanaf stand I van de winding.

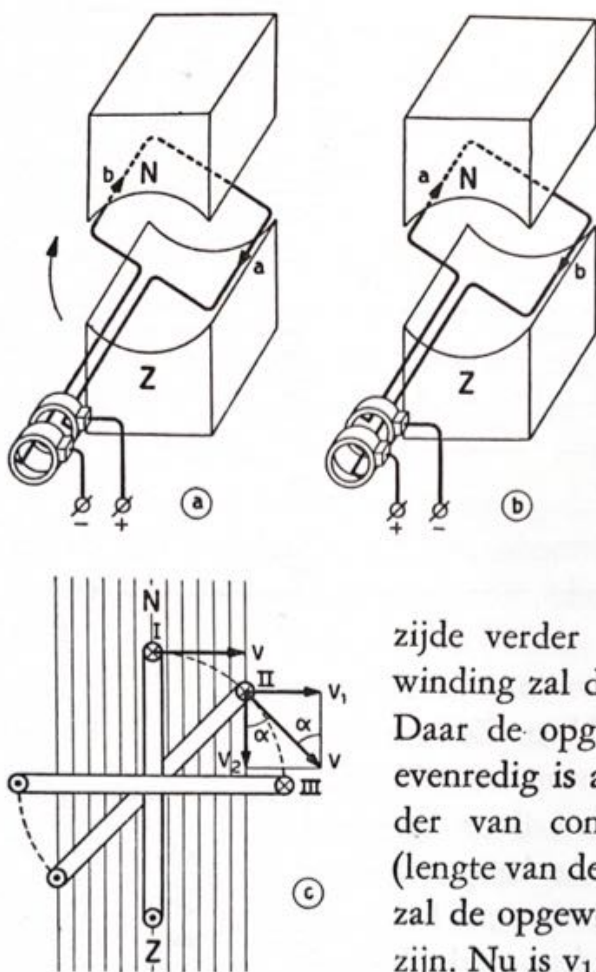


Fig. 32

De electrische stroom, veroorzaakt door de e.m.k. wanneer de stroomketen wordt gesloten, kan afgenomen worden aan een paar sleepringen, een tweetal ringen dus, die geïsoleerd op de as van de rotor zijn opgesteld en waaraan de uiteinden van de winding zijn vastgemaakt.

Om een voldoend grote e.m.k. te verkrijgen is het weer nodig verscheidene windingen tot een spoel te wikkelen, terwijl voor

veldwikkelingen worden omgepoold, teneinde te zorgen, dat het remanent magnetisme van de magneetkernen niet verloren gaat.

Van de gelijkstroommachines zijn enige karakteristieken van belang. De karakteristieken geven elk het verband tussen twee grootheden van de machine. Voor gelijkstroomgeneratoren zijn belangrijk:

1. *de nullastkarakteristiek*; deze grafiek geeft de klemspanning van de machine als functie van de veldstroom. De spanning van een machine is natuurlijk afhankelijk van de veldsterkte van het magnetisch veld, dus van de stroomsterkte door de veldwikkelingen. De nullastkarakteristiek wordt opgenomen bij een constant toerental en bij onbelaste machine. De klemspanning is dus tevens de e.m.k.

2. *de belastingkarakteristiek*; deze grafiek geeft de klemspanning als functie van de veldstroom bij een constante belasting en een constant toerental.

3. *de uitwendige karakteristiek* is de grafiek, die de klemspanning als functie van de belastingstroom weergeeft bij een constante veldstroom en een constant toerental.

4. *de regelkarakteristiek* geeft de veldstroom als functie van de belastingstroom bij een constante klemspanning en toerental.

5. *de kortsluitkarakteristiek* tenslotte geeft de ankerstroom als functie van de veldstroom bij een constant toerental en een kortgesloten uitgang.

Voor de verschillende soorten machines (shunt-, serie- en compoundmachines) wijken de karakteristieken af.

In fig. 37 is de nullastkarakteristiek getekend van een machine met afzonderlijke bekrachtiging. De veldwikkeling is dus geheel gescheiden van de netspanning van de dynamo.

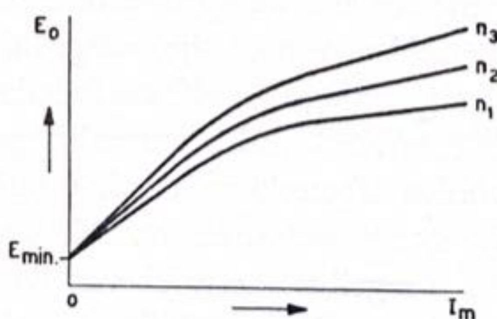


Fig. 37

Zoals je ziet neemt de e.m.k. die op de verticale as in de vorm van de klemspanning bij nullast is uitgezet toe met toenemende veldstroom I_m. Eerst gaat dit lineair, maar na enige tijd neemt de E_0 minder snel toe, door de

kleine stroom door de veldwikkeling geven, die het veld weer opwekt.

De schakelingen van de seriedynamo en van de compounddynamo in fig. 36 spreken verder voor zich.

Zowel bij motoren als bij dynamo's valt op te merken, dat bij shuntmachines, waarbij de veldwikkeling dus parallel op het anker is aangesloten en dus ook op het net, de wikkeling bestaat uit tamelijk veel windingen van dun draad, teneinde door de hoge spanning een betrekkelijk kleine stroom te krijgen. Daar het veld wat de sterkte betreft bepaald zal worden door het aantal ampère-windingen (het product van de stroom in ampères en het aantal windingen van de bekrachtigingsspoel) zal door het grote aantal windingen ondanks de vrij kleine stroom een sterk veld worden opgewekt.

Bij de seriemachines daarentegen gaat de hoofdstroom door de veldwikkeling. Daar deze stroom naar verhouding groot is zal een klein aantal windingen voldoende zijn om het veld op te wekken, hetgeen ook maar goed is, omdat veel windingen een grote weerstand van de veldwikkeling zou betekenen, dus een hoog spanningsverlies.

De draairichting van een gelijkstroommotor wordt bepaald door de richting van de krachten, die op de spoelzijden werken. Deze richting hangt weer af van de richting van het veld en van de stroom door de spoelzijde. Keert men dus de stroomrichting in het anker om, dan zal de motor in tegengestelde richting gaan draaien. Keert men evenwel de stroomrichting in de veldwikkelingen om, dan zal de motor eveneens in tegengestelde richting gaan draaien. Indien men beide, èn veldwikkelingen èn ankerwikkelingen, ompoolt, zal de motor in dezelfde richting blijven draaien.

Voor het omkeren van de draairichting van een gelijkstroommotor staan evenwel niet al deze middelen ter beschikking. Het is regel, dat men de magneten niet mag ompolen, zodat voor het omkeren van de richting alleen het ompolen van het anker is toegestaan.

Bij generatoren kan men eveneens de polariteit van de machine willen omkeren. In dat geval kan men natuurlijk zonder meer de ankerwikkelingen ompolen. Het is echter nodig, dat dan ook de

Tevens zie je, dat N- en Z-polen elkaar afwisselen. Men past meer dan twee polen toe om materiaal te besparen.

Het bekrachtigen van de veldwikkeling kan weer op verschillende manieren tot stand komen. Behalve de weinig toegepaste afzonderlijke bekrachtiging, waarbij de veldwikkeling is aangesloten op een geheel gescheiden stroombron (van een accumulatorenbatterij) kan men de veldwikkeling op de dynamo zelf aansluiten. In dat geval ontstaat een shuntdynamo (fig. 36b). Het lijkt misschien vreemd, dat dit gaat, omdat je geen veld kunt hebben voordat je spanning op de klemmen van het anker krijgt, terwijl je geen spanning op het anker kunt krijgen, zolang je geen veld hebt! Toch gaat het wel, omdat er altijd een klein beetje remanent magnetisme bestaat in het ijzer van de polen. Zodra de machine dus eenmaal gedraaid heeft zal zij steeds wel genoeg remanent magnetisme overhouden om een kleine spanning in het anker op te wekken. Deze kleine spanning kan dan een

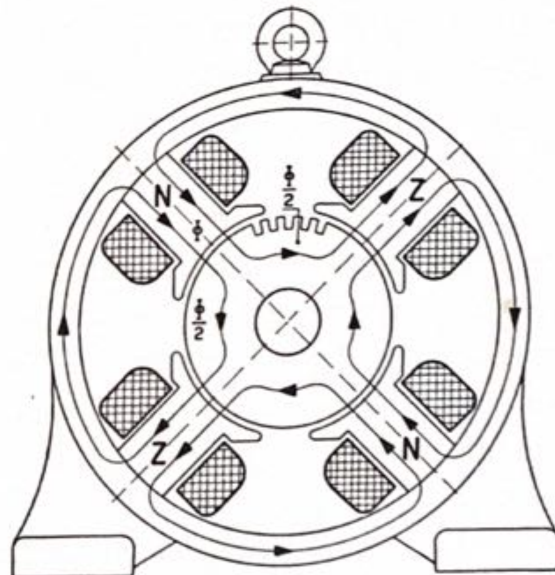


Fig. 35

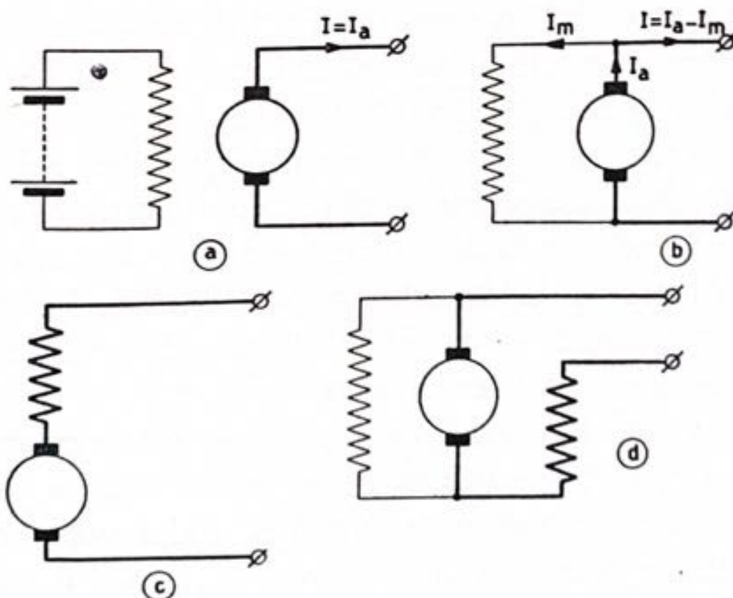


Fig. 36

opgenomen. Reeds in het begin blijkt, dat de klemspanning in het algemeen iets lager ligt dan bij afzonderlijke bekrachtiging. Dat is duidelijk, als je bedenkt, dat bij afzonderlijke bekrachtiging de veldstroom onafhankelijk is van de klemspanning van de machine; de veldstroom is daarom constant. Bij zelfbekrachtiging daarentegen hangt de veldstroom van de klemspanning van de machine af, en deze zakt bij toenemende stroom. Doordat de veldstroom daalt zal de e.m.k. van de machine dalen, waardoor de klemspanning weer verder daalt. Er stelt zich dan wel een evenwicht in, maar het resultaat is natuurlijk, dat de klemspanning bij een bepaalde stroom van de machine lager ligt dan bij afzonderlijke bekrachtiging van de magneten. Maar maakt men nu de uitwendige weerstand telkens kleiner, zodat de klemspanning steeds meer daalt, dan komt er een ogenblik, dat de klemspanning veel sneller afneemt dan R_u, zodat de machinestroom ($I = E_k/R_u$) af- in plaats van toeneemt. Dit blijkt uit het omkeren van de karakteristiek bij de stroom $I = q$ in fig. 41. Dit gaat dan zo verder totdat bij $I = p$ de machine kortgesloten is, en de stroom door het anker gelijk is aan de kortsluitstroom.

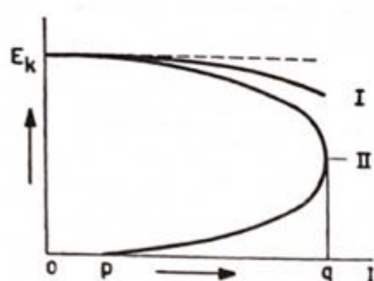


Fig. 41

De regelkarakteristiek van de shuntdynamo heeft ongeveer dezelfde vorm als die van de zelfbekrachtigde dynamo.

Bij de seriedynamo, waarbij dus het veld in serie met de hoofdstroom is geschakeld zijn de karakteristieken natuurlijk anders dan bij de shuntdynamo, die toch nog het meeste op de afzonderlijk bekrachtigde machine lijkt. Ankerstroom (hoofdstroom) en veldstroom zijn hier één!

Voor de nullastkarakteristiek moet men afzonderlijke bekrachtiging toepassen, daar bij nullast van de machine geen veldstroom mogelijk is. Daardoor heeft de nullastkarakteristiek weinig zin, daar zij natuurlijk gelijk wordt aan die van de afzonderlijk bekrachtigde dynamo. Evenmin heeft de belastingkarakteristiek enige zin, omdat bij de seriedynamo de veldstroom en de hoofdstroom immers niet afzonderlijk van elkaar kunnen worden geregeld.

en dus de klemspanning wel weer op het oude peil te brengen is. In hoeverre nu de veldstroom bij toenemende ankerstroom moet worden vergroot geeft de regelkarakteristiek aan. Voor de afzonderlijk bekrachtigde dynamo is een regelkarakteristiek in fig. 39 geschetst. Je ziet, dat de totale veldstroom op een bepaald punt bestaat uit de normale veldstroom, die je ook bij nullast nodig hebt plus een extra veldstroom, die dient om het verlies in klemspanning door de toenemende ankerstroom te compenseren.

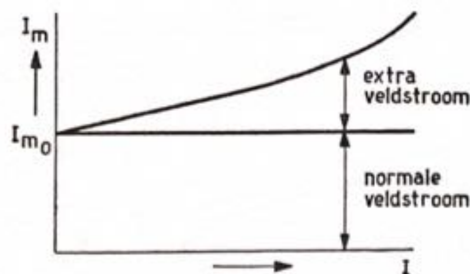


Fig. 39

Bij de kortsluitkarakteristiek is de machine kortgesloten. De klemspanning is dus nul. Om nu door het anker een normale stroom te krijgen heb je maar heel weinig e.m.k. nodig, omdat de weerstand van de keten zo klein is. Daarom maak je dan de veldstroom zeer klein en werk je dus ver beneden de verzadiging van het ijzer van de magneten. Daarom zal de kortsluitkarakteristiek van de machine een rechte lijn zijn. Ook hier is de invloed van het remanent magnetisme te zien. Wanneer je nl. de veldwikkelingen geheel afschakelt, zodat $I_m = 0$ zal er toch bij kortgesloten machine een ankerstroom lopen, die veroorzaakt wordt door de e.m.k., opgewekt door het remanent magnetisme van de machine!

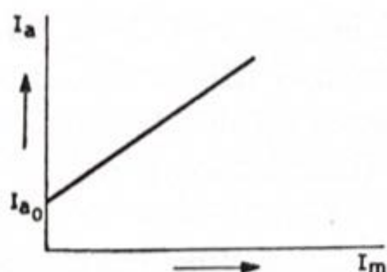


Fig. 40

Nu wij kort de verschillende karakteristieken van de eenvoudigste generator hebben bekeken, zullen wij nagaan wat de invloed is van het schakelen van de veldwikkelingen op het anker, of in serie ermee, op de verschillende karakteristieken.

Zowel de nullastkarakteristiek als de belastingkarakteristiek van een shuntdynamo is vrijwel gelijk aan die van de afzonderlijk bekrachtigde dynamo's. De uitwendige karakteristiek echter verschilt enigszins.

In fig. 41 is de karakteristiek getekend. Kromme I geldt voor afzonderlijke bekrachtiging. Kromme II is bij zelfbekrachtiging

verzadiging van het ijzer van de magneten. Zoals je ook ziet zal een hoger toerental een grotere spanning geven ($n_3 > n_2 > n_1$). Verder is het ook aardig te constateren, dat bij $I_m = 0$, dus bij uitgeschakelde veldstroom toch nog een e.m.k. wordt opgewekt, hetgeen te danken is aan het remanent magnetisme.

De belastingkarakteristiek van deze machine zal dezelfde vorm hebben als de nullastkarakteristiek, omdat het enige verschil met nullast is, dat er een inwendig spanningsverlies op elk punt van de grafiek moet worden afgetrokken om de klemspanning uit te zetten.

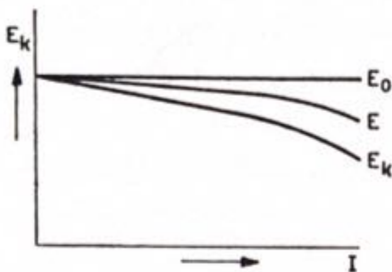


Fig. 38

In fig. 38 is de uitwendige karakteristiek van de machine getekend. Bij toenemende belasting, dus bij toenemende stroom door het anker zal de e.m.k. afnemen. Dat klinkt gek, want bij een stroombron is immers de e.m.k. een constante grootheid. Je verwacht wel, dat de klemspanning afneemt, maar dat komt dan doordat de inwendige spanningsval toeneemt. Samen blijven zij immers steeds gelijk aan een constant getal : de e.m.k. Evenwel treedt hier een bijzonder verschijnsel op, dat de ankerreactie wordt genoemd. Doordat de stroom door het anker groter wordt, wordt het veld *van deze stroom* ook sterker. Dit veld nu verzwakt een klein beetje het hoofdveld van de magneten. Het resultaat is, dat het totale werkzame veld iets kleiner wordt, waardoor de opgewekte e.m.k. iets kleiner is. Inderdaad neemt dus bij toenemende I de opgewekte e.m.k. af, hetgeen blijkt uit het omlaagzakken van de lijn, aangeduid met E. De grafiek, die dan de klemspanning E_k geeft als functie van I zakt weer lager, omdat van de e.m.k. telkens het inwendig spanningsverlies van de e.m.k. moet worden afgetrokken. Dit inwendig spanningsverlies wordt natuurlijk steeds groter naarmate de stroom door het anker toeneemt.

De regelkarakteristiek van de machine geeft aan hoe groot de veldstroom bij verschillende belastingstromen moet zijn om de klemspanning constant te houden. Je begrijpt, dat als de hoofdstroom toeneemt de klemspanning daalt (zie fig. 38). Je begrijpt ook, dat als je de veldstroom steeds groter maakt de e.m.k. stijgt

toeneemt bij toenemende stroom, hetgeen niet meer het geval zal zijn, wanneer het ijzer van de magneten verzadigd raakt. In elk geval is het aanloopkoppel, dat is het koppel bij inschakelen van de motor, waarbij de inschakelstroom groter is dan de normale stroomsterkte, groter dan bij shuntmotoren het geval is.

Er is echter ook een minder aangename eigenschap van de seriemotor. De veldsterkte is evenredig aan de ankerstroom I_a (zolang er geen verzadiging optreedt). Is de belasting van de motor klein, dan is I_a klein en dus ook de veldsterkte. Het toerental wordt dan zeer groot. Het resultaat is, dat wanneer je de belasting van een seriemotor afschakelt het toerental van de motor veel te hoog oploopt: de motor slaat op hol, zoals dat heet.

Bij electrische tractie geldt dit bezwaar niet, omdat de belasting van de motoren door de tram of trein zelf wordt gevormd. Het hoog aanloopkoppel, dat juist goed te gebruiken is om de tram of trein op gang te brengen is echter wel een groot voordeel. Dit maakt de seriemotor bij uitstek geschikt voor electrische tractie.

Ook bij kranen gebruikt men de seriemotor vaak. Daar kan echter de belasting (de last van de kraan) wel wegvallen, al was het maar, doordat men de kraan inschakelt, zonder dat aan de haak een last hangt. De motoren kunnen dan echter betrekkelijk gemakkelijk worden beveiligd. Daartoe gebruikt men een zgn. centrifugaalschakelaar. Dat is een schakelaar, die alleen wordt omgeschakeld (en dan de motor van het net afschakelt) wanneer een bepaald toerental van de motor bereikt wordt. Men stelt nu de schakelaar zo in, dat bij normale toerentallen de schakelaar niet kan uitschakelen. Slaat de motor echter op hol, dan zal de centrifugaalschakelaar de motor uitschakelen en wordt deze dus voor vernieling beschermd.

Het toerental van een seriemotor is dus niet constant, maar bij een kleine belasting groot en lager bij een grotere belasting. Dit is ook de reden, waarom men de motor gebruikt voor kranen, omdat het wenselijk is, dat een zware last langzaam en een kleine last snel omhooggetrokken wordt. Deze eis wordt echter niet gesteld bij liften, waarvoor men juist altijd een constante belasting vereist. Bij liften zal men dus shuntmotoren gebruiken.

Combinaties der eigenschappen van serie- en shuntmotoren kan men met de compoundmotor bereiken. Daar men de verhouding

dige weerstand en de toenemende verzwakking van het veld door de ankerreactie. Hierdoor kan men de compoundmachine goed gebruiken op die plaatsen, waar geen toezicht is om de klemspanning constant te houden door veldbijregeling.

Eigenschappen van motoren.

De afzonderlijk bekrachtigde gelijkstroommotor wordt haast niet gebruikt. Alleen bij sommige grote machines bekrachtigt men de veldwikkelingen uit een afzonderlijke stroombron.

Van groot belang is natuurlijk het koppel, dat de motor afgeeft, want dat is het hele doel van de electromotor. Bij een shuntmotor is het afgegeven koppel evenredig aan de opgenomen stroom, dus aan de belasting, mits de bekrachtiging constant wordt gehouden. De karakteristiek ziet er dus uit als in fig. 43. Voorts is het van belang te weten hoe het toerental eventueel verandert. Het blijkt, dat bij een shuntmotor het toerental vrijwel constant is bij verschillende belastingen. Dit is van belang b.v. voor liften, waar men een constante snelheid van de kooi wenst bij verschillende belastingen (met of zonder lading). De shuntmotor is trouwens de meest toegepaste gelijkstroommotor. Hij wordt ook gebruikt voor gereedschapswerktuigen zoals draaibanken, fraisbanken, boormachines, enz. Ook voor pompen is het de aangewezen motor. Tenslotte wordt de shuntmotor steeds gebruikt voor het aandrijven van motorgeneratoren, dus omzetters, die bestaan uit een motor, die op één as een dynamo aandrijft.

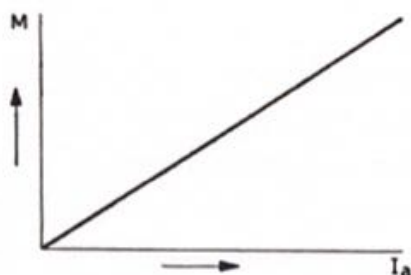


Fig. 43

Bij de seriemotor, waarbij dus de veldwikkelingen in serie met het anker op het net zijn aangesloten krijgt men heel andere eigenschappen. Het koppel van de seriemotor verandert evenredig met het kwadraat van de ankerstroom. Dat komt natuurlijk doordat bij toenemende ankerstroom in de eerste plaats de stroom door de spoelzijden toeneemt, maar in de tweede plaats de sterkte van het veld, omdat de ankerstroom tevens bekrachtigingsstroom is. Dit is natuurlijk alleen maar waar zolang het veld inderdaad in sterkte

De uitwendige karakteristiek is in fig. 42 geschetst. In het begin zal de klemspanning toenemen. Daarbij blijft natuurlijk de klemspanning steeds beneden de nullastspanning, doordat inwendig spanningsverlies optreedt in het anker en in de veldwikkelingen. Zolang er geen verzadiging van het ijzer is, zal de klemspanning evenredig toenemen. Maar zodra de verzadiging van de magneten zich doet gelden, zal de klemspanning spoedig niet meer toenemen en zelfs gaan afnemen. Dat komt, doordat de toeneming van de e.m.k. zo klein is, dat het toenemend spanningsverlies in anker en veldwikkelingen de overhand krijgt.

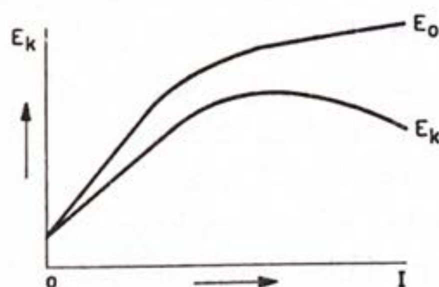


Fig. 42

De compounddynamo heeft karakteristieken, die uit twee karakteristieken (van shunt- en van seriemachine) kunnen worden gedacht te zijn ontstaan. Wat de overhand heeft, de serie- of de shunt-eigenschappen, hangt af van de samenstelling van de compound-machine. Je kunt immers best een compoundmachine hebben, waarbij de shunt-eigenschappen de overhand hebben, omdat er maar een klein veld is gemaakt door seriewikkelingen en het grootste deel van het opgewekte veld ontstaat door de parallel-geschakelde wikkelingen.

Daar de seriewikkeling bij nullast stroomloos blijft zal bij een compounddynamo de nullastkarakteristiek gelijk zijn aan die van een shuntmachine.

De belastingkarakteristiek zal dezelfde vorm hebben als die van de shuntdynamo, dus van de afzonderlijk bekrachtigde dynamo, maar zal in het algemeen iets hoger liggen, omdat de invloed van de seriewikkeling zich doet gelden. De belastingstroom zal nl. meewerken aan de opwekking van het veld door de seriewikkeling.

Het belangrijkste is wel de uitwendige karakteristiek van de machine. Deze kan zeer vlak gemaakt worden, zodat de klemspanning nagenoeg constant is bij verschillend afgenomen stromen. Door een juist aantal seriewindingen te gebruiken kan men bereiken dat de e.m.k. evenredig zal stijgen, naarmate de klemspanning de neiging vertoont te dalen door de toenemende verliezen in de inwen-

wisselstroomgenerator geen commutator hoeft te hebben en in principe niet veel verschilt van de reeds besproken gelijkstroomdynamo's.

Je kunt je dus voorstellen, dat een spoel of enkele spoelen welke in serie of in serie-parallelschakeling staan op een rotor zijn gemonteerd, terwijl deze rotor draait in een magnetisch veld, dat uiteraard wordt opgewekt met behulp van electromagneten. In dat geval draait dus de spoel of draaien de spoelen, die de electrische energie leveren, terwijl de polen stilstaan. Men spreekt dan van buitenpoolmachines.

Bij grotere machines voor grotere vermogens zal men echter de zaak omdraaien, waarbij de polen op de rotor worden gemonteerd terwijl de stroomleverende spoelen stilstaan op de stator. Natuurlijk maakt dat in principe niet veel uit, alleen de practische uitvoering wordt erdoor vergemakkelijkt. Indien nl. het vermogen, dat de generator moet leveren groter wordt zal het moeilijker worden deze energie van de draaiende rotor af te nemen.

Het afnemen van de energie is mogelijk met twee of meer zgn. sleepringen, dat zijn ringen van koper, die geïsoleerd op de as van de machine zijn gemonteerd en die verbonden zijn met de uiteinden van de spoelen. De stroom kan dan met koolborstels van de sleepringen worden afgenomen, net als dat geschiedt met de collector van een gelijkstroomdynamo.

Er is natuurlijk minder kans op vonken, daar er tijdens het draaien van de machine niet geschakeld wordt zoals dat met de collector doorlopend het geval is. Evenwel blijft het natuurlijk nodig de doorsnede van de koolborstels zodanig te kiezen, dat de vereiste stroomsterkte kan worden afgenomen.

Je zou misschien denken, dat grotere generatoren toch met zeer hoge spanningen werken, zodat de stromen ondanks grote vermogens toch wel klein blijven, maar dat is niet juist. Werkelijke hoogspanning b.v. 10.000 volt of meer is zeer moeilijk onder de knie te houden. Het lukt wel op de hoogspanningsleidingen en in de oliekabels, maar je moet dan niet vragen wat voor isolatoren je nodig hebt, terwijl alle spanning-voerende delen een minimum-afstand van geaarde delen moeten blijven. *In* de machine is dat natuurlijk niet mogelijk, omdat de isolatie, hoe goed die ook is niet te dik kan

het anker dient voor het aanzetten van de motor en daarbij de inschakelstroom te beperken.

Een voorbeeld van een aanzetweerstand is weergegeven in de tekening van fig. 44. De hefboom wordt vanaf het nulcontact achtereenvolgens op de volgende contacten geschakeld, waarbij steeds meer voorschakelweerstand wordt afgeschakeld, en de toelaatbare stroom door de motor dus niet behoeft te worden overschreden. Naarmate de motor harder gaat draaien levert hij meer tegen-e.m.k. op, zodat een grotere klemspanning kan worden toegelaten.

Schakelt men nu de motor uit met behulp van de hoofdschakelaar, dan staat de aanzetweerstand dus nog in de rechtse stand. Zou men dus vergeten bij het weer inschakelen van de hoofdschakelaar de aanzetweerstand weer naar links te plaatsen, dan zou de motor zonder voorschakelweerstand zo maar op het net worden aangesloten. Dit zou een overbelasting van het net betekenen, waardoor smeltveiligheden of magnetische maximaalschakelaar zouden uitvallen. Daarom is de aanzetweerstand voorzien van een nulspanningsautomaat. Deze bestaat uit een magneet, die de handle van de weerstand in de rechtse stand houdt zolang er spanning op het net staat. Valt de spanning uit, hetzij doordat de hoofdschakelaar wordt uitgeschakeld, hetzij doordat het net tijdelijk wordt uitgeschakeld, dan trekt de magneet de handle dus niet meer aan en daar er een veer is aangebracht, die tracht hem in de linkse stand te draaien, valt de weerstand bij uitvallen van de spanning vanzelf terug in de beginstand, dat is dus de stand links in de tekening.

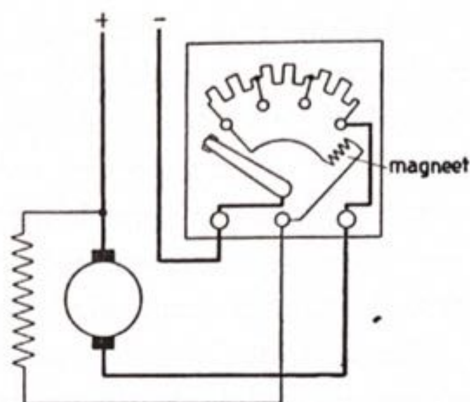


Fig. 44

Wisselstroomgeneratoren.

Wij hebben in het begin van dit hoofdstuk al gezien, dat elke dynamo in principe wisselspanning zal leveren. Alleen dank zij de aanwezigheid van een commutator kan deze wisselspanning in een pulserende gelijkspanning worden omgezet. Dit houdt in, dat een

serie- en shunt-wikkeling zelf kan kiezen kan men bepalen of men de compoundmotor een serie- of een shunt-neiging zal geven.

Gelijkstroommotoren kunnen in het algemeen gemakkelijk in toerental worden geregeld. Dit is zeer belangrijk b.v. voor tractie waarbij men toch de snelheid van het voertuig moet kunnen regelen. Daarom zal men voor tractie gelijkstroommotoren gebruiken, hoewel dit ook nadelen oplevert. Er zijn echter geen wisselstroommotoren, waarbij het toerental zo gemakkelijk kan worden geregeld. De wisselstroommotoren hebben juist de eigenschap, dat zij zeer moeilijk een ander toerental kunnen krijgen.

De regeling van het toerental van een gelijkstroommotor geschiedt door regeling van de klemspanning van de motor, hetgeen weer kan worden verkregen door meer of minder voorschakelweerstanden in serie met de machine te schakelen.

Er is nog een mogelijkheid om het toerental van een gelijkstroommotor te veranderen. Men kan het veld verzwakken. In de regel kan men het veld niet veel versterken, omdat men al uit economische overwegingen met een zo sterk mogelijk veld werkt. Door veldverzwakking echter is het mogelijk het toerental van een motor te verhogen. Dit vindt vrij veel toepassing daar waar uitgebreide toerenregeling nodig is, b.v. bij tractie. De grootste snelheid wordt dan verkregen met een verzwakt veld, waarbij dus een deel van de veldwikkelingen wordt uitgeschakeld, zodat het aantal ampèrewindingen afneemt en het veld dus zwakker wordt. Toch kan men door veldverzwakking niet onbeperkt het toerental verhogen. Het zwakke veld werkt nl. ongunstig op het koppel (dat rechtstreeks afhankelijk is van ϕ), waardoor bij verzwakking van het veld de ankerstroom toeneemt. Een ander gevolg is, dat de ankerreactie nu belangrijk begint te worden, daar het hoofdveld verzwakt is. Het gevolg (verdraaiing van het veld) is, dat men moeilijkheden krijgt met de commutatie. Een toerenregeling tot 15% naar boven kan echter in de regel wel toegelaten worden.

Bij shuntmotoren wordt ook veldverzwakking toegepast voor het regelen van het toerental. Hiertoe wordt in serie met de veldwikkelingen een variabele weerstand opgenomen. Soms wordt deze toerenregel-weerstand gecombineerd tot één variabele weerstand met de zgn. aanzetweerstand, een variabele weerstand, die in serie met

De spoelen worden in serie geschakeld, natuurlijk zo dat de e.m.k.'s der spoelen met elkaar meewerken.

De meeste grote machines zijn echter geen éénfasemachines, maar

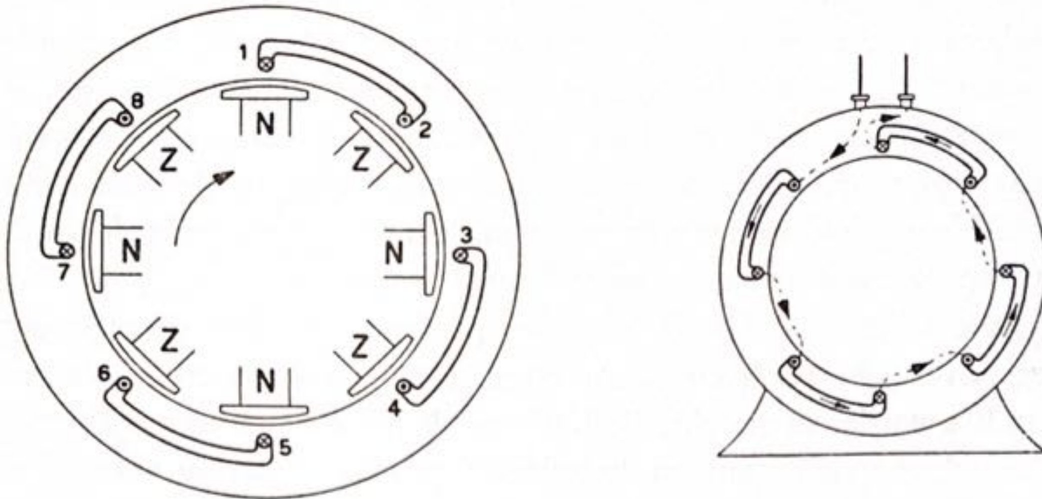


Fig. 46

driefasegeneratoren. Houden we als voorbeeld een achtpolige machine aan, dan moeten dus de wikkelingen zodanig gemaakt worden, dat telkens één pool*paar* een draaistroom opwekt. Uit het eerste hoofdstuk weet je, dat bij een draaistroom drie stromen ontstaan, die 120° uit elkaar liggen, waarbij de perioden van de stromen 360° voorstellen, dus bij 50 Hz een tijd van 1/50 seconde. Om dit te bereiken worden tegenover elk poolpaar drie wikkelingen geplaatst (natuurlijk in een geschikt aantal gleuven), die 120° t.o.v. elkaar zijn verschoven. Je zult zeggen : dat klopt niet in de tekening (fig. 47), doch je moet dan echter wel bedenken, dat je te maken hebt met een meerpolige machine en dat elk poolpaar samen met een wikkeling een volledige draaistroom moet opwekken. Er zijn dus als het ware 4 machines, ieder met twee polen. We maken daarom onderscheid tussen electrische en ruimte-

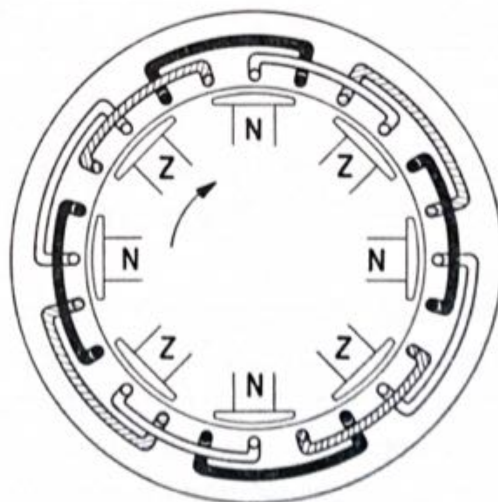


Fig. 47

of wel 60 maal 50 = 3000 omwentelingen per minuut. Dat is voor een kleine machine nog geen bezwaar, maar wanneer je te maken hebt met een grote machine, dan wordt het in de practijk wel wat moeilijk het gevaarte, dat de rotor vormt met dat betrekkelijk grote toerental te laten draaien! Het is trouwens geheel overbodig, want naarmate je het aantal polen groter kiest kan het toerental kleiner worden. Heb je b.v. vier polen, dan worden bij één omwenteling van de rotor twee perioden van de wisselstroom geleverd. Het toerental bij dezelfde netfrequentie is dus gehalveerd, nl. 1500 t/min. Zo vind je voor 6 polen: 1000 t/min, voor 8 polen: 750 t/min enz.

Afgezien van het feit, dat bij een stilstaande ankerwikkeling, die je dus bij het binnenpooltype hebt, de stroom van stilstaande klemmen kan worden afgenomen is het ook een voordeel, dat de isolatie minder te lijden heeft, dan wanneer de ankerwikkelingen draaiden. Tenslotte is het een feit, dat de rotor bij toepassing van een „poolrad" zoals in fig. 45 kleiner kan zijn en dus een kleinere massa kan hebben, hetgeen uit constructieve overwegingen wel de voorkeur verdient.

Een bijzonderheid van de wisselstroomgenerator is wel, dat hij niet rechtstreeks zijn veld kan opwekken, zoals dat b.v. bij de shuntdynamo het geval is. De generator levert immers wisselstroom, terwijl de magneten gevoed moeten worden met gelijkstroom. Daarom dienen de magneten te worden gevoed met een aparte gelijkstroomdynamo, die echter weer zonder bezwaar op één as met de generator kan worden geplaatst. Breng je nu de generator aan het draaien, dan zal de dynamo de magneten bekrachtigen, waardoor in de ankerwikkelingen een e.m.k. wordt opgewekt.

De sterkte van de bekrachtigingsstroom en daarmede de sterkte van het magnetisch veld van de generator kunnen worden geregeld met behulp van een variabele weerstand. De opwekdynamo, die dus vaak met de generator op dezelfde as is gekoppeld is meestal een shuntdynamo.

In fig. 46 is de wikkeling van een éénfase, achtpolige generator, schematisch afgebeeld. Je moet je voorstellen, dat elk poolpaar bestaande uit één Noord- en één Zuidpool een e.m.k. opwekt in een spoel. Er zijn dus in totaal 4 spoelen en er is één gleuf per pool.

worden; dit zou immers verlies betekenen doordat er een te grote luchtspleet ontstond (isolatieruimte moet gerekend worden tot de luchtspleet, daar het geen ijzer bevat!). Het is dus niet mogelijk machines te maken die voor zeer hoge spanningen geschikt zijn en in de practijk zal zelfs de grootste machine met een vrij lage spanning werken, b.v. 3000 volt, terwijl direct achter de machine omhoog wordt getransformeerd in een of meer stappen tot 10.000 volt en veel hoger, tot b.v. 380.000 volt toe.

Een en ander betekent dus, dat bij een grote machine de af te nemen stromen niet onbelangrijk zullen zijn en het afnemen aan een of meer sleepringen geeft bezwaren.

Er is trouwens een veel beter middel : men laat nu de polen (dus het magnetisch veld) draaien, terwijl de energieleverende wikkelingen stilstaan. Er moet dan alleen nog electrische energie over sleepringen worden gevoerd voor het voeden van de magneten, maar deze energie is veel geringer (enkele procenten) dan de door de machine af te geven energie.

Zo ontstaat dan de zgn. binnenpoolmachine, waarbij dus de polen als het ware binnen in de machine zijn geplaatst. Schematisch is dit weergegeven in fig. 45 voor een achtpolige generator (4 Noord- en 4 Zuidpolen).

Je zou je nu nog kunnen afvragen waarom men niet twee polen neemt. Ook dat is betrekkelijk eenvoudig te begrijpen. Wanneer je een twee-polige machine neemt zal bij één omwenteling één periode van de wisselstroom worden geleverd. Aangenomen, dat je 50 Hz als frequentie op het net kiest (dat is de in Europa meest voorkomende frequentie; in Amerika 60 Hz) dan zou deze machine dus 50 omwentelingen per seconde moeten maken

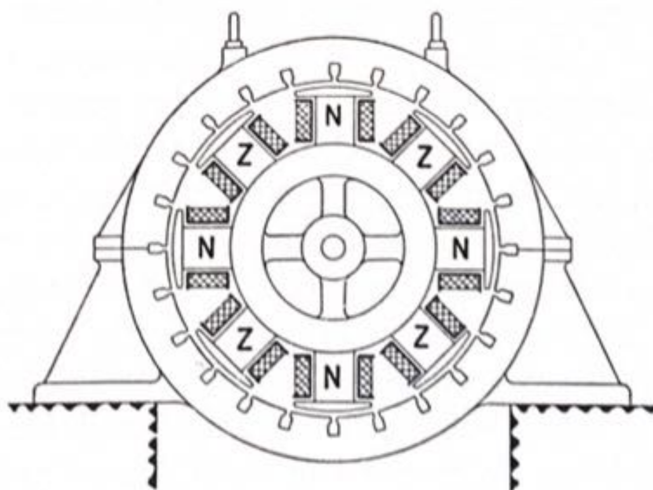
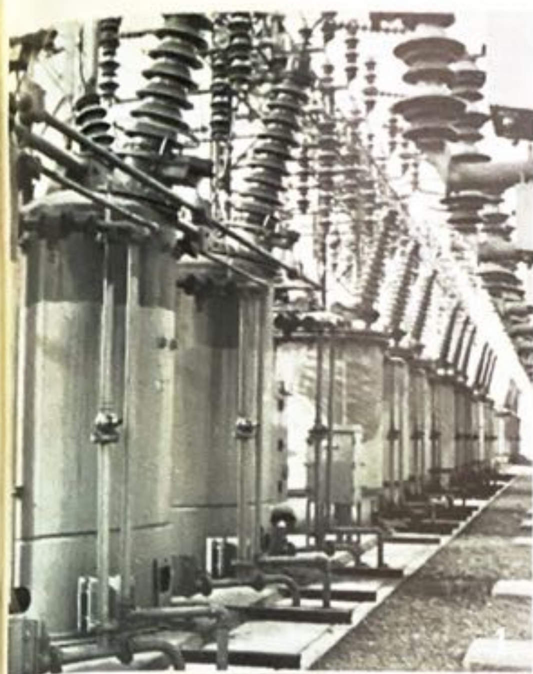
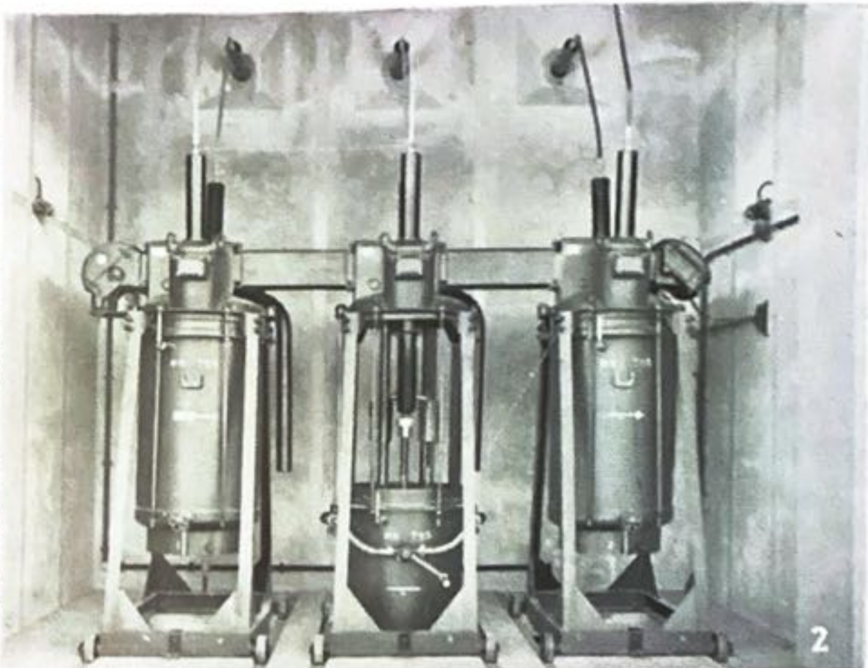


Fig. 45

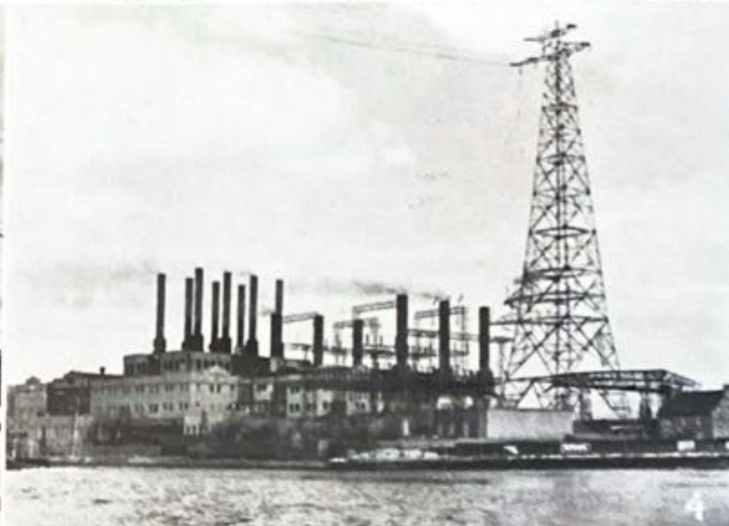


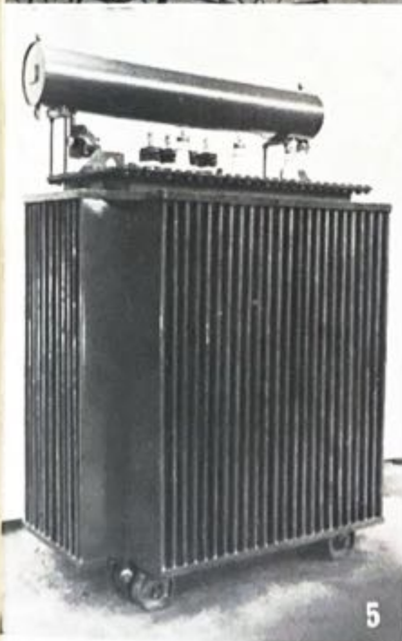
Overzicht op een openlucht hoogspanningsstation voor 132 kV in Engeland; duidelijk zijn
olie- en scheidingsschakelaars te onderscheiden.

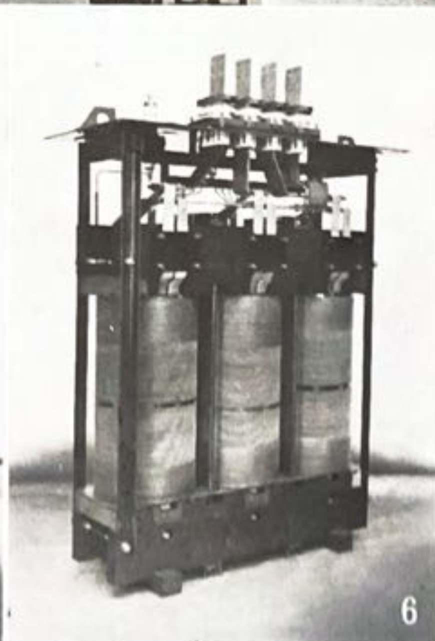


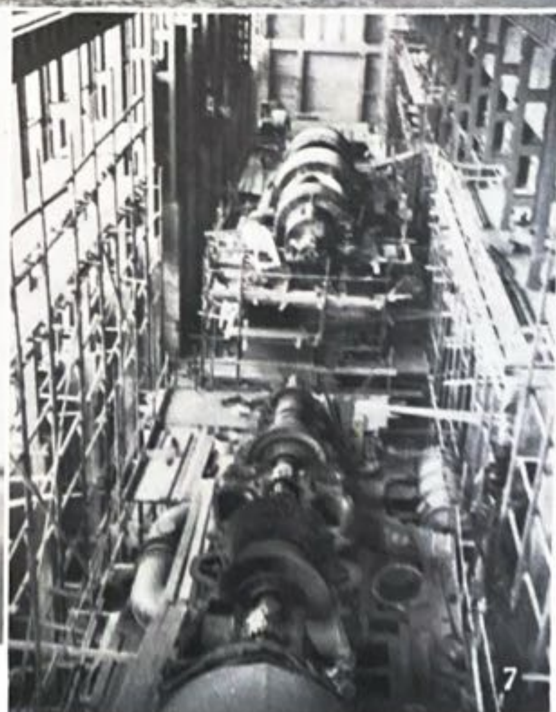












1. Een rij olieschakelaars voor 132 kV in de open lucht. 2. Een drietal olieschakelaars voor één hoogspanningslijn; de middelste is tijdelijk geopend. 3. Twee 132 kV hoogspanningslijnen; let op de bevestiging van de draden aan de masten. 4. Grote eindmast, die dus op zijwaartse trek wordt belast, terwijl de grote hoogte dient voor het vrijhouden van het scheepvaartverkeer over de rivier. 5. Transformator van 600 kVA voor 10.000/380 V. 6. Geopende transformator van 1000 kVA; duidelijk zijn de drie fasewikkelingen te zien. 7. Grote turbines met generatoren in aanbouw in de centrale Velsen van de P.E.N. (Noord Holland).

(foto 2 en 7 van Prov. El. Bedr. van N. Holland; foto 5 en 6 van transformatorenfabr. Smit, Nijmegen).

lijke graden. De hele machine rond is natuurlijk 360°. Maar als je van een Noordpool tot de volgende Noordpool gaat heb je 360 electrische graden doorlopen. In fig. 47 kun je dus gemakkelijk nagaan, dat voor een achtpolige machine 360 electrische graden overeenkomen met slechts 90 ruimtelijke graden. Over 90 ruimtelijke graden moet je dus drie wikkelingen verdelen, zodat deze netjes ⅓ maal 90° = 30° uit elkaar liggen. Telkens wanneer een poolpaar onder een wikkeling is doorgedraaid wordt in de wikkeling dezelfde e.m.k. door het volgende poolpaar wéér opgewekt. Je vindt dus op de machine als het ware 4 maal 3 spoelen.

Drie telkens bij elkaar horende spoelen, dus drie spoelen die tegenover één poolpaar staan vormen één stel spoelen, waarin e.m.k.'s worden opgewekt, die 120° van de periode uit elkaar liggen. Door deze spoelen dus op de juiste wijze met elkaar te verbinden kun je een draaistroom verkrijgen. Zoals je je wellicht uit hoofdstuk 1 herinnert kun je daarbij b.v. één uiteinde van de drie spoelen met elkaar verbinden tot een sterpunt, terwijl de drie andere uiteinden van de spoelen de drie fasespanningen t.o.v. het sterpunt geven. Het is echter ook mogelijk de spoelen te verbinden in „driehoek". De schakeling is dan zoals in fig. 48 is aangegeven. De gekoppelde spanning is daarbij gelijk aan de fasespanning. De stroom in elke draad echter blijkt bij gelijkmatige belasting over de drie fasen gelijk te zijn aan $I_{fase} \sqrt{3}$. Tenslotte merken we op, dat de machine van fig. 47 een gleuf per pool en per fase heeft. In de practijk neemt men echter vaker drie gleuven per pool en per fase, waardoor een veel ingewikkelder wikkelschema ontstaat.

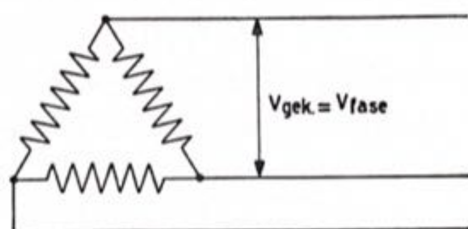


Fig. 48

Een wisselstroomgenerator is in principe altijd te gebruiken als wisselstroommotor. Laat men wisselstroom door het anker van een eenfase-generator vloeien, dan zal, afhankelijk van de richting van de stroom op een bepaald moment een veld ontstaan, dat tracht een Noord- of een Zuidpool van het poolrad aan te trekken. Nemen we aan, dat de motor draait, zodat dit dus ook met het poolrad het

Wanneer je op de stator van een motor een draaistroomwikkeling legt, dus bestaande uit drie wikkelingen voor elke fase of een aantal malen drie wikkelingen, dan kan men aantonen, dat het resultaat van de drie wisselvelden, die ontstaan door de drie fasen van de draaistroom, een draaiend veld zal zijn. Dat komt doordat op elk ogenblik de drie velden van de drie fasen samenwerken. Deze drie velden moeten dus worden samengesteld en op elk ogenblik leveren zij dus tezamen één veld met één bepaalde richting. Doordat de velden sinusvormig veranderen (de stroom door de spoelen is immers sinusvormig) en doordat ook tussen de drie stromen een faseverschil van 120° bestaat zal het resultaat zijn, dat de som van de drie velden regelmatig in een bepaalde richting draait. Deze draairichting hangt af van de volgorde der drie fasen, die men in het algemeen met de letters R, S en T aanduidt. Zo kan dus de volgorde zijn: RST of b.v. TRS. In beide gevallen echter is de volgorde dezelfde. Immers als je hebt RST, volgt na T toch weer R, enz. Voor het werkelijk veranderen van de volgorde zul je twee fasen van plaats moeten laten verwisselen in het schema RST. Dit kan b.v. zijn RTS of wat hetzelfde is TSR. Het komt er dus op neer, dat de draairichting van het draaiveld veranderd kan worden door twee van de drie fasedraden onderling te verwisselen. Inderdaad zal dan de motor in de andere richting gaan draaien.

Heb je nu op een stator drie wikkelingen, voor elke fase één, dan zal het draaiveld per periode één omwenteling maken, zodat het draaiveld 3000 t/min maakt. Heb je echter tweemaal drie wikkelingen, dus achtereenvolgens R-S-T-R-S-T dan zal het draaiveld per periode slechts een halve omwenteling maken, want per periode draait het veld maar éénmaal de cyclus R-S-T. Bij 50 Hz is het toerental van het draaiveld dus 1500 t/min. Zo kun je het toerental van het draaiveld voor andere aantallen wikkelingen op de stator gemakkelijk zelf nagaan.

Hoe krijgen we nu een rotor, die zich in het draaiend magnetisch veld bevindt aan het draaien? Stel je voor, zoals in fig. 49 is getekend, dat je twee ringen hebt, waartussen staven zijn gemaakt en dat deze als rotor in het draaiveld van de motor geplaatst worden. Dan zal dit draaiveld gaan draaien. Eerst staat het weliswaar stil, maar door het draaien van het veld wordt in de staven van de kooi

echter gebruik maken van een afzonderlijke motor en men gaat er dan toe over de synchrone motor te voorzien van een kortsluitanker, waardoor de motor asynchroon aanloopt. Hoe dit asynchrone draaien mogelijk is zal hierna nader worden uiteengezet.

Een volgende bijzonderheid van de synchrone machine is, dat zij bij overbelasting uit de pas kan vallen. Je moet je dat als volgt voorstellen: belast je de synchrone motor, dan tracht het wisselveld de rotor met hetzelfde toerental draaiende te houden. Het wisselveld van een éénfasemotor kan nl. gedacht worden te bestaan uit twee ronddraaiende componenten, twee draaiende velden. Beide zijn dan even sterk en draaien even snel terwijl zij t.o.v. elkaar in tegengestelde richting draaien. Dat verklaart ook, dat je een synchrone motor in twee richtingen kunt laten draaien, mits het een éénfasemotor is.

Belast je dus de motor dan zal zijn toerental niet kleiner worden, maar wel raakt hij een beetje achter bij het draaiende veld (dus een van de componenten van het wisselveld). Naarmate je de belasting aan de as van de motor groter maakt zal het achterraken van de rotor t.o.v. het veld groter worden, maar nog steeds volgt de rotor het veld met hetzelfde toerental. Raakt de rotor echter te veel achter, dan kan het veld de polen van de rotor als het ware niet meer houden en valt de machine uit de pas. Je begrijpt, dat wanneer de polen eenmaal hebben „losgelaten" de machine even langzamer draait en niet meer door het veld zal worden meegenomen, door de grote massa van de rotor met de aan de as hiervan hangende belasting. Een synchrone machine valt dus bij overbelasting uit de pas.

Erg veel worden de synchrone motoren in grotere vermogens niet gebruikt doordat zij de volgende nadelen hebben: het moeilijk aanlopen, het gemakkelijk uit de pas vallen bij stotende belasting en het feit, dat de magneetpolen met gelijkstroom moeten worden bekrachtigd, waarvoor een aparte machine nodig is.

Een veel interessantere motor is de asynchrone motor. De naam wijst er reeds op, dat de rotor niet even snel draait als het magnetisch veld. Het voordeel van deze machine is, dat zij vanzelf aanloopt, terwijl geen gelijkstroom nodig is voor het bekrachtigen van polen. Algemeen gebruikt men voor het voeden van motoren draaistroom.

geval is, dan kan de toestand ontstaan, dat in hetzelfde tempo waarmee de stroom van richting in de ankerwikkeling verandert onder deze wikkeling een Noord- en de daaropvolgende Zuidpool draait. Indien nu de rotor langzamer zou willen gaan draaien zal het wisselveld onder de ankerwikkelingen zich daartegen verzetten en het poolrad weer in het normale tempo „trekken". Zou daarentegen om een of andere reden de rotor sneller willen gaan draaien dan verzet het wisselveld zich eveneens daartegen. Het poolrad wordt dan zoveel geremd, dat het normale tempo wordt aangehouden. De omwentelingssnelheid van een dergelijke machine is dus afhankelijk van de frequentie van het net, omdat deze het aantal wisselingen van het wisselveld per seconde bepaalt. Wij noemen een dergelijke machine een synchrone motor, omdat hij synchroon met de machines in de centrale draait. Draaien deze nl. sneller, dan gaan alle op het net aangesloten synchroonmotoren eveneens sneller draaien. Houdt men de frequentie van het net zeer constant, hetgeen tegenwoordig algemeen gebeurt, dan draaien de synchroonmotoren dus met een constant toerental. In het kleine worden synchroonmotoren dan ook veel gebruikt voor het aandrijven van electrische klokken, die dus steeds gelijk blijven lopen, mits de frequentie van het net constant is. Mocht de frequentie van het net te laag zijn gedurende een zekere tijd, dan heeft men nog een middel om de klokken alle gelijk te zetten. Immers zij lopen dan alle evenveel achter en door de frequentie gedurende een zekere tijd iets hoger dan normaal te kiezen is het toerental der klokken iets te hoog en komen na een zekere tijd de klokken alle weer op tijd te staan.

Een bijzonderheid van synchrone machines is, dat zij niet vanzelf kunnen aanlopen. Immers wanneer het net op de ankerwikkelingen wordt aangesloten is de frequentie meteen 50 Hz, waardoor de rotor dadelijk op volle toeren getrokken zou moeten worden om „in de pas" met het wisselveld te blijven. Het veld is echter niet in staat de grote massa van de rotor aan de gang te brengen. Men zal daarom een synchrone motor moeten laten aanlopen op andere wijze, nl. asynchroon, of door uitwendige aandrijving. Een voorbeeld van uitwendige aandrijving bij zeer kleine motoren is het starten van een electrisch klokje of het aan de gang brengen van een synchrone gramofoonmotor. Voor grotere machines moet men

dan weet je dus, dat hij *afgeeft* 10 pk of wel 10 × 0,736 kW = 7,36 kW. Hij neemt dan uit het net méér vermogen op, nl. $^{10}/_{9}$ maal 7,36 kW. Op een wisselstroommotor vind je meestal nog aangegeven de cos φ waaronder hij werkt, zodat je de opgenomen stroom ook kunt berekenen.

Bij generatoren heeft het rendement dezelfde betekenis, nl. afgegeven vermogen/opgenomen vermogen. Alleen wordt hier mechanisch vermogen opgenomen, uitgedrukt in pk terwijl electrisch vermogen wordt afgegeven, uitgedrukt in kW. Ook bij een generator treden natuurlijk mechanische verliezen op, terwijl ook electrische verliezen ontstaan, zijnde het inwendige verlies van de stroombron.

Een bijzondere wisselstroommotor is de collectormotor, die in fig. 50 schematisch is getekend. Deze motor kan in aanmerking komen voor electrische tractie, waarbij je geen asynchrone motor kunt gebruiken, omdat het aanloopkoppel klein is, terwijl de toerenregeling vrijwel onmogelijk is. Het draaiende deel van de motor is daarom als bij een gelijkstroommotor uitgevoerd met een collector. Men noemt deze motoren dus wisselstroomcollectormotoren en zij kunnen ook op gelijkstroom werken. Behalve voor tractie (treinen) kan men ze ook gebruiken voor vele doeleinden, waarvoor kleine motoren gebruikt worden (b.v. stofzuigermotoren).

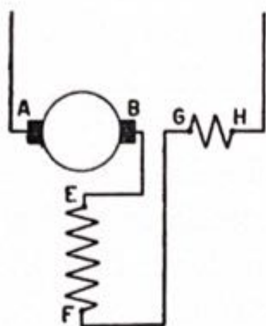


Fig. 50

Het voordeel van deze motor is, dat de snelheid gemakkelijk kan worden geregeld. Er zijn ook draaistroomcollectormotoren gemaakt, die men in plaats van de gebruikelijke asynchroonmotoren kan gebruiken wanneer toerenregeling nodig is. De cos φ is bijna gelijk aan 1.

Voor wisselstroom gebruikt men meestal seriemotoren. Natuurlijk moet het magneetgestel gelamelleerd worden om wervelstromen te voorkomen, daar de veldspoel ook door wisselstroom wordt doorlopen. Door de veldwikkeling zou de cos φ klein worden omdat deze wikkeling veel zelfinductie heeft. Daarom brengt men op de magneet nog een compensatiewikkeling aan, die het ankerveld en

voor aansluiting in driehoek (de wikkelingen zijn dus geschikt voor de gekoppelde spanning van het net). Men schakelt de wikkelingen echter bij het aansluiten van de motor (aanlopen) in ster, waardoor de opgenomen stroom kleiner is dan normaal. Nadat de motor enigszins op toeren is gekomen, draait men de ster-driehoek-schakelaar een stand verder en worden de wikkelingen omgezet in driehoekschakeling.

Snelheidsregeling bij wisselstroommotoren is erg lastig. We zagen immers al, dat bij de synchrone motor toerenregeling in het geheel onmogelijk is, terwijl deze bij de asynchrone motor hoegenaamd niet mogelijk is, daar het gebied, waarover het toerental kan worden veranderd niet groot is. Er is echter wel een methode om het toerental (sprongsgewijze) te regelen. Daarbij verandert men het aantal polen van de machine. Dit kan door de wikkelingen onderling anders te schakelen.

Onder het rendement van een motor verstaat men de verhouding tussen het afgegeven en het opgenomen vermogen. Het afgegeven vermogen wordt meestal uitgedrukt in paardekrachten (pk). 1 pk is 75 kgm/sec, zodat je met dat vermogen b.v. 75 kg één meter kunt heffen in één seconde. Wil je het in een halve seconde doen of wil je in één seconde een gewicht van 150 kg één meter heffen, dan heb je dus 2 pk nodig. Het omrekenen van mechanisch vermogen in pk in electrisch vermogen in kilowatts is gemakkelijk als je weet, dat 1 pk = 736 watt of dus 0,736 kW. Hieruit volgt weer, dat 1 kW ruim een pk is, nl. 1,36 pk.

Het rendement van een motor kan geen 100% zijn, omdat er zowel electrische als mechanische verliezen in de motor optreden. De mechanische verliezen zijn b.v. de wrijving der mechanische delen, dus lagers, enz. De electrische verliezen ontstaan gedeeltelijk in de wikkelingen (koperverliezen) omdat hier een stroom door moet gaan en deze wikkelingen enige eigen weerstand hebben. Gedeeltelijk bestaan de verliezen ook uit verliezen in het ijzer, d.w.z. wervelstroomverliezen. Deze zijn gering, omdat de wervelstromen tot een minimum beperkt zijn door het ijzer te lamelleren.

Grotere motoren hebben een hoger rendement, daar de verliezen *naar verhouding* een kleinere rol spelen. Heeft een motor dus een rendement van b.v. 0,9 of wel 90%, en is het een motor van 10 pk,

een e.m.k. opgewekt (hetzelfde als wanneer de staven snel werden bewogen in een stilstaand veld). Deze e.m.k. kan een grote stroom opleveren, omdat de staven dik zijn, terwijl zij aan het einde zijn kortgesloten door twee gemeenschappelijke ringen. Deze stromen zijn nu zo gericht dat zij de oorzaak van hun ontstaan trachten tegen te werken, d.w.z. de staven moeten niet meer zo erg door de krachtlijnen van het veld gesneden worden. Daar dit veld in een richting draait, en de kooi draaibaar is (rotor) zal deze gaan draaien en wel zo lang, totdat ze bijna even snel draait als het draaiveld.

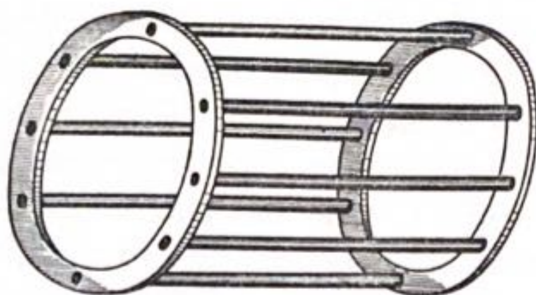


Fig. 49

Even hard als het draaiveld kan deze kortsluitkooi niet gaan, want op dat ogenblik zou er geen sprake meer zijn van snijden van krachtlijnen en staven, zodat de drijvende kracht van de rotor zou zijn vervallen. De rotor van deze machine draait dus beslist iets langzamer dan het draaiveld, dus niet-synchroon. We noemen deze machine dan ook asynchroon. Het verschil in toerental noemen wij de *slip* van de motor. Deze slip zal groter worden naarmate de belasting aan de as van de motor groter wordt. Daarbij zal ook het vermogen, uit het net opgenomen, groter worden. De stroomsterkte wordt dus evenals trouwens bij alle electromotoren door de belasting bepaald.

Daar de slip niet erg groot is bij volle belasting is het toerental van deze motoren, hoewel niet constant, niet erg afhankelijk van de belasting. Het voordeel is wel, dat er geen energie-overbrenging van stilstaande delen naar de draaiende rotor nodig is. Bovendien is de constructie van de rotor vrij eenvoudig, waardoor deze goedkoop kan worden vervaardigd.

Hoewel men kan aanlopen met een stator-aanloopweerstand wordt bij niet al te grote motoren van de sterdriehoekschakeling gebruik gemaakt. De wikkelingen van de stator kunnen natuurlijk zowel in ster als in driehoek op het draaistroomnet worden aangesloten. Men maakt de wikkelingen nu zo, dat zij geschikt zijn

verlichting, dan zal men natuurlijk niet zo moeten handelen, want in de motorgenerator treden verliezen op, die uitgespaard kunnen worden omdat verlichting evengoed rechtstreeks op de batterij kan worden aangesloten, mits de spanningen maar met elkaar overeenkomen. De verliezen in een motorgenerator zijn naar verhouding natuurlijk groter dan bij een motor of een generator alleen, daar nu zowel voor de generator als voor de motor mechanische en electrische verliezen optreden. Het rendement van een motorgenerator is dus betrekkelijk laag.

Een motorgenerator kan men voorts ook in omgekeerde richting gebruiken, d.w.z. uit wissel- of draaistroom gelijkstroom maken, b.v. voor het laden van een accumulatorenbatterij. De periodenomvormer werkt eveneens als motorgenerator, waarbij dus een motor een bepaald toerental maakt bij de primaire frequentie, terwijl de generator vermogen levert bij de gewenste secundaire frequentie.

Gelijkstroom kan men ook in wisselstroom en omgekeerd omzetten met slechts één machine. Men spreekt dan van een éénankeromvormer. Inderdaad is er maar een anker, waarop een wikkeling is aangebracht die als wisselstroomwikkeling kan dienen. Op de juiste manier zijn echter op de wikkeling aftakkingen gemaakt, die met de lamellen van een collector zijn verbonden. Aan de collector kan men dan gelijkstroom afnemen of toevoeren. Het voordeel van de éénankeromvormer is natuurlijk het hogere rendement, daar slechts van één machine de mechanische verliezen in rekening behoeven te worden gebracht. Verder kunnen ook de electrische verliezen geringer zijn dan het geval zou zijn in twee machines. Op een éénankeromvormer tref je dus behalve een collector met twee borstels (meestal aan de ene kant van het anker) drie sleepringen voor het toevoeren van draaistroom (meestal aan de andere kant van het anker). De éénankeromvormer wordt veel gebruikt in samenwerking met een transformator om de wisselspanning op de juiste waarde te brengen.

Voor het omzetten van wissel- of draaistroom in gelijkstroom maakt men gebruik van gelijkrichters. Wij komen hierop in hoofdstuk IX terug. De buizengelijkrichters hebben het voordeel, dat zij geen bewegende delen bevatten, waardoor geen mechanische ver-

wikkeling omkeren wanneer een halve periode later de polariteit van het wisselstroomnet is omgekeerd.

Verdraait men nu de met elkaar verbonden borstels, dan zal een draaiend koppel ontstaan, omdat de velden van stator en rotor nu met elkaar een koppel kunnen vormen. De motor zal dus draaien. De richting van stator- en rotorvelden verandert gelijktijdig en wordt bepaald door het wisselstroomnet. Het koppel blijft dus doorlopend in dezelfde richting werken.

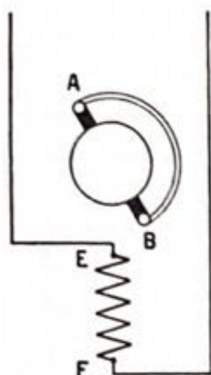


Fig. 52

Verdraait men de borstels naar de andere kant (fig. 51c) dan ontstaat een koppel in tegengestelde richting en de motor draait de andere kant op. Deze motor wordt ook wel kortsluitmotor genoemd, vanwege de kortgesloten borstels. In fig. 52 is het schakelschema van de motor aangegeven.

Omvormers.

Onder omvormers verstaat men machines, die in staat zijn de electrische energie van de ene soort in de andere te transformeren. Men kan gelijkstroom in wisselstroom omzetten of omgekeerd, maar men kan ook wisselstroom van de ene frequentie in de andere omzetten. Zo zal men frequentieverhoging toepassen wanneer men met electromotoren een zeer hoog toerental wil halen. Met het kleinste aantal polen kan een wisselstroommotor niet sneller draaien dan 3000 t/min bij een frequentie van 50 Hz. Wil men dus een motor een groter toerental laten maken, dan zal de netfrequentie van 50 Hz evenredig moeten worden verhoogd.

Voor gereedschapsmotoren gebruikt men ook vaak een 180 Hz net, vooral als het gaat om kleinere gereedschapsmotoren, zoals boormachines, enz. Daartoe heeft men dus een perioden-omvormer nodig, die 220/380 volt 50 Hz omzet in 220/380 V 180 Hz.

Onder een motorgenerator, één der soorten omvormers, verstaat men een motor, die rechtstreeks met een generator gekoppeld is. De motor kan dus b.v. een gelijkstroommotor zijn en de generator een wisselstroom- of draaistroomgenerator. Deze zou men kunnen gebruiken bij een accumulatorenbatterij, die bij het uitvallen van het net als noodinstallatie moet dienen. Gaat het alleen om een nood-

de zelfinductie van het anker opheft. De motor heeft een groot aanloopkoppel, terwijl de snelheid toeneemt bij afnemende belasting. De motor gedraagt zich dus als een gelijkstroomseriemotor. De draairichting kan door ompoling van rotorwikkeling of van de statorwikkeling worden veranderd. Bij grotere motoren kan men voor de toerenregeling de spanning verlagen of verhogen, waartoe men een transformator zal gebruiken met regelbare spanning.

De repulsiemotor is schematisch voorgesteld in fig. 51. Er zijn een veldwikkeling en een ankerwikkeling. Nemen we aan, dat de stroom

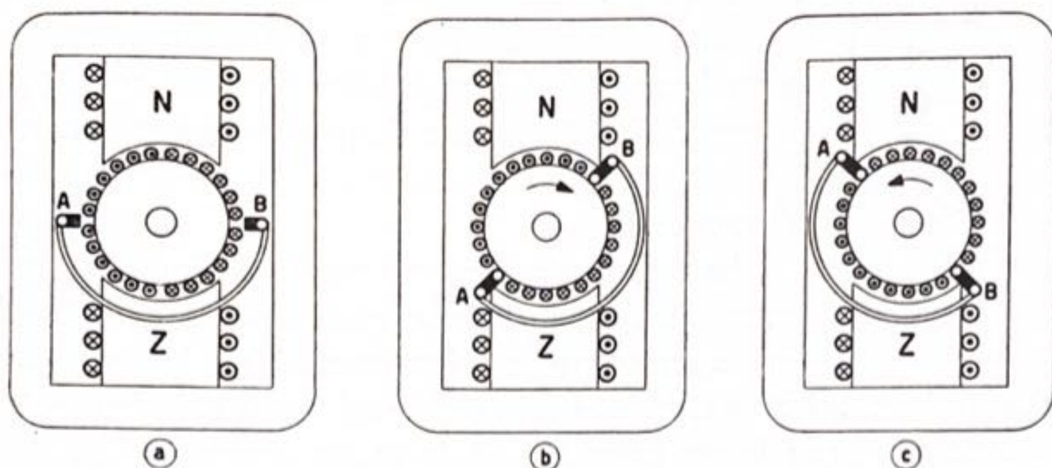


Fig. 51

op een goed ogenblik door de veldwikkeling loopt, zoals in fig. 51a is aangegeven, dus aan de linkerkant van ons afgaand en aan de rechterkant dus naar ons toekomend, dan zal een magnetisch veld worden opgewekt met boven een Noordpool en beneden een Zuidpool.

Op het anker is een wikkeling aangebracht, die eindigt op de lamellen van een collector, doch die niet verder met het net is verbonden. De borstels van de collector zijn met elkaar verbonden. In fig. 51a is de stand van de borstels (die verdraaibaar zijn) zodanig, dat er niets zal gebeuren. De veldwikkelingen waar een wisselstroom door vloeit zullen in de ankerwikkeling een wisselstroom opwekken, doch in de stand van de borstels, zoals die in fig. 51a is aangegeven zal geen draaiend koppel ontstaan. Natuurlijk zal de richting van de stroom zowel in de veldwikkeling als in de anker-

secundaire stroom door de secundaire spoel opgewekt wordt. Doordat het veld verzwakt wordt ontstaat in de primaire spoel een kleinere tegen-e.m.k. De opgenomen stroom door de primaire kant van de transformator stijgt dus onmiddellijk. Daardoor wordt het magnetisch veld zo versterkt totdat de oorspronkelijke grootte weer is bereikt. De primaire stroom wordt dus onmiddellijk bepaald door het afgenomen vermogen aan de secundaire kant, terwijl de sterkte van het veld zich geheel automatisch regelt, afhankelijk van de belasting.

Tengevolge van verliezen in koper en ijzer zal de verhouding in aantallen windingen van de primaire en secundaire spoelen niet geheel overeenkomen met de verhouding der primaire en secundaire spanningen. Er moet een zeker percentage spanningsverlies worden verrekend.

Men tracht de vorm van de kern altijd zo te maken, dat zoveel mogelijk de krachtlijnen van het primaire veld door de secundaire spoel worden omvat. Alles wat buiten om de secundaire spoel gaat betekent verlies. De vorm van de kern, zoals die in principe in fig. 53 is aangegeven, komt weliswaar voor bij zeer kleine transformatoren, maar hij is niet erg gunstig in verband met het weglekken van een deel van het veld.

Een betere vorm van de kern is de mantelkern, die in fig. 54 getekend is. Op het middenbeen is zowel de primaire als de secundaire spoel gemonteerd. Het magnetisch veld gaat dus in zijn geheel door het middenbeen van de kern en verdeelt zich bij het terugkeren in de twee buitenbenen. Deze laatste kunnen dus theoretisch slechts voor de helft zo dik zijn als het middenbeen. De stippellijn geeft de weg van het magnetisch veld aan en je ziet dat dit gesloten is. Het lekveld, dat is dus dat deel van het veld, dat door lucht gaat in plaats van door het ijzer, en dat daarbij dus veel weerstand ondervindt, is bij de manteltransformator zo klein moge-

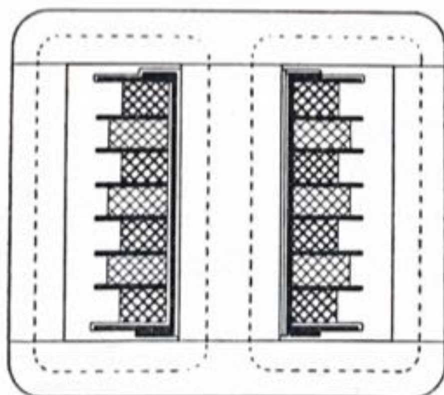


Fig. 54

van de transformator is de kant waaraan energie wordt toegevoerd; de secundaire kant die waaraan de energie weer wordt afgenomen. De ijzeren kern dient om het magnetisch veld van de primaire spoel zoveel mogelijk binnen in de secundaire spoel te krijgen, waardoor de transformator met zo min mogelijk verliezen werkt. De primaire spoel in fig. 53 (de linkse spoel) heeft weinig windingen van tamelijk dik draad. De secundaire spoel heeft veel windingen van dunner draad. Deze transformator transformeert dus de spanning omhoog. Daar het afgenomen vermogen (weer afgezien van de verliezen) gelijk is aan het opgenomen vermogen zal de secundaire stroom kleiner zijn dan de primaïre. Dat is trouwens het gehele doen van de hoogspanning, waar men met een zo laag mogelijke stroom de verliezen in het net ook zo laag mogelijk wil houden.

De werking is in principe als volgt. Indien door de primaire spoel een wisselstroom vloeit zal de spoel een wisselveld opwekken. De sterkte van het veld hangt o.a. af van het aantal windingen van deze spoel. Dit wisselveld wil men nu zoveel mogelijk door de andere spoel laten omvatten. In elke winding van de secundaire spoel wordt door het wisselveld een e.m.k. opgewekt (zie het eerste hoofdstuk). Naarmate méér secundaire windingen in serie tezamen de secundaire spoel vormen zal deze een hogere e.m.k. geïnduceerd krijgen, bij een gegeven sterkte van het veld.

Ook in de primaire wikkeling wordt door de zelfinductie, die deze heeft een e.m.k. opgewekt, die tegengesteld is aan de aangelegde e.m.k. Bij nullast, d.w.z. bij onbelaste secundaire spoel van de transformator is de tegen-e.m.k. zowat even groot als de aangelegde en het gevolg is dat de opgenomen stroom (de nullaststroom van de transformator) klein is. Hij is echter sterk in fase verschoven met de aangelegde klemspanning en wel bijna 90°! Daardoor is deze magnetiseringsstroom vrijwel wattloos.

Gaat men nu de secundaire kant van de transformator belasten, dan zal de geïnduceerde e.m.k. een secundaire stroom veroorzaken, die door de secundaire spoel en de belasting vloeit. Deze secundaire stroom is elk ogenblik tegengesteld gericht aan de primaire stroom, omdat de secundaire stroom de door de primaire stroom opgewekte veldveranderingen tegenwerkt. Het primaire veld ondergaat zodoende een verzwakking door het secundaire veld, dat door de

liezen optreden. Hun rendement is belangrijk hoger dan bij machinegelijkrichters het geval is.

Transformatoren.

Het grote voordeel van wisselstroom is dat deze vorm van energie zich gemakkelijk door middel van transformatoren van de ene in de andere spanning laat omzetten. Deze apparaten hebben geen bewegende delen, hetgeen tot gevolg heeft dat het rendement zeer hoog kan worden gemaakt (bij zeer grote transformatoren practisch 99%), terwijl zij vrijwel geen bediening vereisen. Deze spanningsomzetting is, zoals wij in het volgende hoofdstuk zullen zien onmisbaar voor het transport van electrische energie over grotere afstanden. Daar electrische energie alleen in het groot economisch geproduceerd kan worden zal men grote centrales moeten maken, die de energie over vrij grote afstanden moeten distribueren. Hierbij moet men met hogere spanningen werken dan mogelijk is direct bij de opwekking in de centrales. De spanning moet dus bij het verlaten van de centrales omhoog worden getransformeerd. Bij de verbruiker kan de spanning niet hoger zijn dan voor een veilig bedrijf toelaatbaar is. Vóórdat de electrische energie dus aan de verbruiker wordt afgeleverd zal de spanning dus weer omlaag moeten worden getransformeerd.

Indien het transformeren van de spanning niet met een zo hoog rendement mogelijk was, zou de electrische energie niet een zo economische vorm van energie zijn als nu het geval is.

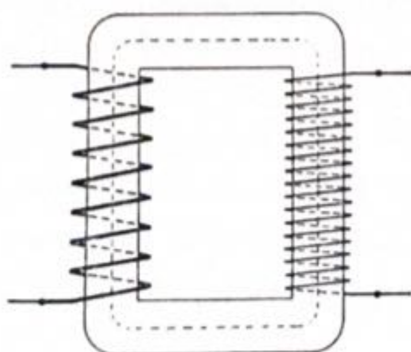
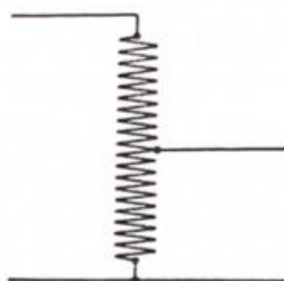


Fig. 53

In fig. 53 is het principe van de transformator weergegeven. Op een ijzeren kern zijn twee spoelen aangebracht. De ene spoel heeft veel windingen, terwijl de andere spoel er maar weinig bezit. Sluiten wij nu op de spoel met veel windingen een bepaalde spanning aan, dan zal in de spoel met weinig windingen een secundaire spanning worden opgewekt die lager is. De spanningen verhouden zich, afgezien van verliezen, als het aantal windingen der spoelen. De primaire kant

tezamen gebruikt worden zal men toch beschikken over draaistroom, zodat met een dergelijke transformator ook motoren kunnen worden gevoed. Deze zig-zag-schakeling wordt dus alleen toegepast voor huisaansluitingen, waarbij dus geen garantie bestaat dat de drie fasen gelijkmatig worden belast. Voor andere aansluitingen, waarop alleen motoren worden aangesloten of b.v. verwarmingsinstallaties, die steeds met drie fasen tegelijk kunnen worden in- en uitgeschakeld past men òf de ster- òf de driehoekschakeling toe.

Een bijzondere vorm van transformator is de zgn. spaartransformator. De schakeling is in fig. 56 weergegeven en je zult wel direct begrijpen wat de bedoeling is. De transformator heeft nl. maar één spoel, waarop een aftakking is aangebracht op die plaats waar de gewenste spanning verkregen kan worden. De hoogste spanning wordt natuurlijk over de hele spoel geschakeld. Je kunt de transformator zowel voor omlaag- als voor omhoogtransformeren gebruiken. Indien de primaire spanning nl. de lage is, dan sluit je die aan op de aftakking (en de onderzijde). De hogere spanning kun je dan over de hele spoel afnemen. Dit zou je met een potentiometer (weerstand met aftakking) niet kunnen doen, maar bij de spaartransformator wordt door de onderste primaire windingen ook in de bovenste windingen een e.m.k. geïnduceerd. Het onderste deel van de gehele wikkeling dient dus zowel voor primaire wikkeling als voor secundaire.


Fig. 56

Verder kan het een bezwaar zijn dat er een galvanische verbinding bestaat tussen primaire en secundaire kant. Dit zou nooit toelaatbaar zijn bij hoogspanningstransformatoren die laagspanning voor verbruikers moeten leveren. Er zijn echter vele gevallen waarbij men de spaartransformator zeer goed kan gebruiken. Het voordeel van de spaartransformator is dat hij veel zuiniger werkt. Dit komt b.v. doordat de lek van het magnetisch veld vaak geringer is maar vooral ook doordat slechts een deel van het secundaire vermogen in de transformator wordt omgevormd. Een belangrijk deel van het secundaire vermogen wordt nl. rechtstreeks van het net betrokken.

treedt. Behalve de drie fasewikkelingen die in de figuur zijn getekend en de secundaire wikkelingen voorstellen komen op de drie benen van de kern natuurlijk nog de drie fasewikkelingen van de primaire wikkeling (hoogspanningswikkeling). De wikkelingen worden ook hier in secties verdeeld. Er worden ook mantelkerntransformatoren voor draaistroom gemaakt met hetzelfde doel als bij de éénfasetransformator.

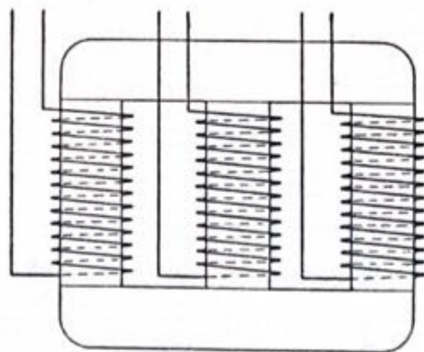
De secundaire wikkeling van een omlaag transformerende draaistroom-transformator (die dus 220/380 V levert voor licht en kracht) kan in ster of in driehoek worden geschakeld. Uiteraard zal voor verlichting driehoekschakeling niet worden toegepast. Men kan sterschakeling toepassen waarbij men dan over de fasespanning van 220 V beschikken kan. Indien de secundaire van de transformator dienen moet voor het voeden van huisverlichting, waarbij dus geen zekerheid bestaat over gelijkmatige belasting van de drie fasen, past men een andere schakeling van de wikkelingen toe. Hoewel de drie fasen van de draaistroom zo goed mogelijk over de verschillende huisaansluitingen worden verdeeld treden natuurlijk nog verschillen in belasting op de drie fasen op. Teneinde de invloed van deze verschillende belastingen op het primaire net (hoogspanningskant) zoveel mogelijk teniet te doen verdeelt men de secundaire wikkelingen in twee delen. Er ontstaan op die manier dus zes secundaire wikkelingen, die twee aan twee op een been van de transformator zijn aangebracht en die dus ook twee aan twee een e.m.k. geïnduceerd krijgen, die met één der drie primaire fasen van het hoogspanningsnet in fase is. Indien men deze wikkelingen voortdurend twee aan twee in serie schakelt, maar daarbij telkens twee wikkelingen neemt, die op twee verschillende benen van de transformator zijn gemonteerd, dan zullen verschillen in belasting op de drie secundaire fasen veel minder invloed hebben op de primaire fasen. Natuurlijk moeten daarbij de wikkelingsverhoudingen speciaal voor dat geval berekend zijn, daar de fasespanning voor de drie secundaire fasen opgebouwd wordt met behulp van twee der drie primaire fasen, die telkens 120° t.o.v. elkaar zijn verschoven.

Men noemt deze schakeling de zig-zag-schakeling, omdat in het schakelschema de secundaire wikkeling er zig-zag-vormig komt uit te zien. Wanneer de drie fasedraden van de secundaire wikkeling

lijk. Er bestaat wel een nog betere constructie, waarbij een geheel gesloten ringvormige kern wordt gebruikt, maar het aanbrengen van de spoelen is daarbij zo lastig, dat deze vorm alleen in speciale gevallen wordt gebruikt. Er moet een compromis worden gesloten tussen rendement van de transformator en productieprijs en het gemakkelijk aanbrengen van de spoelen is van het grootste belang bij het bepalen van de productiekosten. Men noemt het middenbeen van de kern de eigenlijke kern en de buitenbenen vormen het zgn. juk van de transformator.

Om de lek nog zoveel mogelijk te verminderen verdeelt men de wikkelingen in delen. Zoals je in de tekening van fig. 54 kunt zien bestaat de secundaire wikkeling uit drie delen, verdeeld tussen vier delen van de primaire wikkeling. De wikkelingen worden in serie geschakeld. Natuurlijk moet de isolatie van de hoogspanningswikkeling t.o.v. de geaarde kern voldoende zijn om doorslag te voorkomen. De verdeling van de spoelen van de hoogspanningswikkeling heeft ook nog voordeel voor de isolatie t.o.v. de windingen van de spoel onderling. Elke sectie van de spoel heeft nu een deel van de volle spanning aan haar klemmen. Indien men er één spoel van maakte zou men deze in lagen moeten maken, waardoor tussen sommige windingen onderling grote spanningsverschillen zouden bestaan. Bij de reeds bestaande isolatieproblemen zouden dan nog problemen komen van de isolatie van de lagen van de spoel onderling, hetgeen de constructie zou bemoeilijken.

De meeste hoogspanningstransformatoren zijn draaistroomtransformatoren. Draaistroom is immers voor de leidingen de meest economische vorm van energie-overbrenging. In fig. 55 zijn de drie fasen van de draaistroom over drie benen van een kerntransformator verdeeld. Door de faseverschillen van 120° tussen de drie fasen zijn ook de velden die in de benen van de kern optreden t.o.v. elkaar 120° in fase verschoven. Dit betekent dat in elk der benen een wisselveld op-


Fig. 55

dair afgegeven *arbeid* gedurende een jaar tot de primair toegevoerde arbeid in die tijd.

De koperverliezen treden natuurlijk zowel op in de primaire als in de secundaire wikkeling. Men is min of meer vrij met het verdelen van de koperverliezen over de twee wikkelingen; vaak zal men dit gelijkelijk over de primaire en secundaire wikkeling doen.

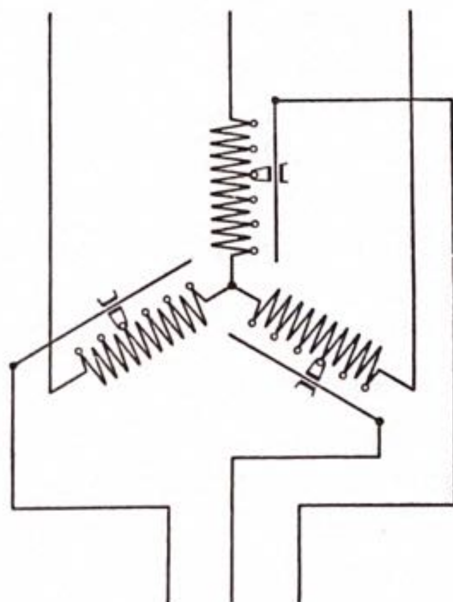
In de sterkstroomnetten werken vele transformatoren samen. Zolang de transformatoren alleen primair zijn aangesloten op één net en secundair volkomen gescheiden zijn doen zich natuurlijk geen bijzonderheden voor. Dit wordt anders wanneer men ook secundair transformatoren parallel wil schakelen.

Bij éénfasetransformatoren moeten dan natuurlijk de transformatieverhoudingen gelijk zijn. De transformatoren moeten bij parallelschakeling een even groot ohms spanningsverlies en een even grote kortsluitspanning hebben. Wanneer dat nl. niet het geval is verdeelt de totale secundaire belasting zich niet op de juiste wijze over de transformatoren. De transformator met het grootste spanningsverlies zou dan de kleinste belasting opnemen. Tenslotte moeten de secundaire wikkelingen vanzelfsprekend zodanig geschakeld worden dat de secundaire spanningen in fase zijn, daar anders een dubbele spanning ontstaat aan beide transformatoren, die door het secundaire net kortgesloten zijn.

Bij het parallelschakelen van draaistroomtransformatoren gelden behalve de bovengenoemde eisen voor éénfasetransformatoren nog de volgende. De volgorde der drie fasen moet voor alle transformatoren gelijk zijn. De wijze van koppelen der wikkelingen moet zowel primair als secundair gelijk zijn. Zo is het niet mogelijk een transformator met zig-zag-schakeling aan de secundaire kant te laten samenwerken parallel met een transformator waarbij de secundaire wikkelingen in ster zijn geschakeld. Ook al zijn daarbij de fasespanningen gelijk, dan nog kloppen de fasen niet met elkaar!

Bijzondere transformatoren zijn nog de zgn. meettransformatoren voor het omlaagtransformeren van spanningen en stromen. Zij worden gebruikt in de hoogspanningstechniek voor het meten van

inrichting waardoor de spoelen van het net worden afgeschakeld wanneer de motor op gang is gebracht. Dit heeft nog het voordeel dat de wikkelingen alleen geschikt behoeven te worden gemaakt voor kortstondig gebruik (het aanlopen duurt niet zo lang). Zij worden dus als het ware iets overbelast en kunnen dus lichter uitgevoerd worden. Daardoor zijn ze dus niet zo duur, waardoor de hele aanlooptransformator ook goedkoper wordt.


Fig. 57

Het rendement van een transformator is weer de verhouding van het afgegeven vermogen (secundair) tot het toegevoerde vermogen (primair). Doordat de transformator geen bewegende delen bezit kan het rendement zeer hoog zijn, hoger dan welk ander electrisch apparaat voor omzetting van energie. De verliezen in een transformator zijn te verdelen in koperverliezen en ijzerverliezen. De koperverliezen zijn die welke in de wikkelingen optreden tengevolge van het feit dat door de wikkelingen de stromen lopen terwijl deze wikkelingen een zekere weerstand hebben. De ijzerverliezen bestaan uit hysteresisverliezen (een gevolg van het telkens, nl. 100 maal per seconde, omkeren van het magnetisme in de kern) en de wervelstroomverliezen (die ondanks de lamellering natuurlijk in de blikken zelf in zekere mate optreden). Nu kan men de ijzer- en koperverliezen bij het ontwerpen van de transformator vrij willekeurig verdelen. Dit betekent dat men bij een transformator, die doorlopend aangesloten is op het primaire net, maar lang niet altijd secundair volbelast is, de ijzerverliezen zo laag mogelijk zal houden. Het gaat hier nl. niet zozeer om het rendement bij vollast, maar om het rendement gerekend over b.v. een jaar. Daar de ijzerverliezen bij kleine belasting een belangrijke rol spelen zal dus het jaarrendement van een dergelijke transformator tamelijk gunstig zijn. Onder het jaarrendement verstaat men de verhouding van de secun-

Wij zullen dit hier niet aantonen. Een ander voordeel van de spaartransformator is dat hij goedkoper in aanschaffing is. Hij is echter alleen te maken wanneer de primaire en secundaire spanningen niet te veel uit elkaar liggen. Ook dit is een reden waarom hij niet voldoet voor hoogspanningsdoeleinden.

De spaartransformator wordt ook vervaardigd voor draaistroom met drie wikkelingen, ieder met een aftakking. De plaats van de aftakking wordt door de gewenste spanningstransformatie bepaald. De spaartransformator wordt ook wel autotransformator genoemd. Het spreekt haast vanzelf, dat beide delen van de wikkeling in fig. 56 niet dezelfde diktedraad hebben. De draaddikte moet voor elk deel worden vastgesteld door na te gaan welke stroom bij volle belasting door de delen zal vloeien. Er zijn ook autotransformatoren met meer dan één aftakking, waardoor meer dan een secundaire spanning kan worden afgenomen.

Regeltransformatoren zijn transformatoren die wikkelingen hebben met verscheidene aftakkingen. Er is een schakelaar aanwezig voor het omschakelen van de secundaire klemmen op de verschillende aftakkingen van de wikkelingen. Hierdoor is het dus mogelijk de spanning van de secundaire klemmen te regelen. Een der secundaire klemmen kan permanent met een der uiteinden van de wikkeling zijn aangesloten terwijl de andere met de schakelaar aan de verschillende aftakkingen kan worden verbonden. Grote regeltransformatoren gebruikt men wel voor het doen aanlopen van motoren. De motor wordt dan steeds op een hogere spanning aangesloten, naarmate hij door een hoger toerental meer tegen e.m.k. gaat geven.

Regeltransformatoren voor draaistroom worden vaak als spaartransformator uitgevoerd. In fig. 57 is als voorbeeld daarvan het schakelschema van een spaar-draaistroom-regel-transformator aangegeven. Een dergelijke transformator kan b.v. gebruikt worden met het uitsluitend doel een motor aan te laten lopen. Zoals uit het schema blijkt zal bij de volle secundaire spanning deze gelijk zijn aan de primaire. Tijdens de werking van de motor staan nu de drie spoelen van de transformator doorlopend op het net geschakeld. Hoewel dit niet veel vermogen opneemt gebruikt men toch een

het dichtstbijzijnde puntje van Noord-Afrika, dan zou het mogelijk zijn, zonder de scheepvaart te hinderen, ongekende hoeveelheden electrische energie op te wekken die, verdeeld over Europa, een geweldige bron van welvaart zouden kunnen opleveren.

Het laten samenwerken van de waterkrachtcentrales van Zwitserland en de Scandinavische landen vereist een behoorlijk koppelnet. Grote hoeveelheden energie moeten over het net op betrouwbare wijze kunnen worden overgebracht. Daartoe maakt men gebruik van zeer hoge spanningen.

Wanneer je electrische energie wilt overbrengen, dan zal het product van spanning en stroom bepalend zijn voor de hoeveelheid. Naarmate je méér energie tegelijkertijd wilt overbrengen, naarmate dus het vermogen groter wordt, zal bij een bepaalde spanning de stroomsterkte moeten stijgen. Daar het vermogen dat in de leidingen verloren gaat evenredig is met I^2R zal voor een economisch transport van energie òf de stroomsterkte beperkt moeten blijven òf de weerstand van de leiding klein moeten worden gehouden. Dit laatste houdt in, dat de doorsnede van de leiding groot moet worden gemaakt, waardoor de hoeveelheid verwerkt koper toeneemt en wel evenredig met de doorsnede. Daarbij komen dan moeilijkheden met de ophanging van de leiding, die ook kosten met zich meebrengen. Zodra dus grote energiehoeveelheden moeten worden overgebracht zal men ertoe overgaan de spanning van de leiding te verhogen. Dit geeft natuurlijk weer nieuwe moeilijkheden, daar de isolatie bij hogere spanningen niet zo eenvoudig meer is.

Voor het overbrengen van een zeker vermogen zal dus een compromis moeten worden gevonden tussen de kosten van energieverlies in de leidingen of van de hoeveelheid verwerkte materialen en de kosten voor de isolatie van de leidingen met alles wat daaraan vastzit, zoals schakelmateriaal, meetinstrumenten, enz.

Niet alleen de rentabiliteit van het net is van belang, maar ook de bedrijfszekerheid. Het mag natuurlijk niet voorkomen, dat de verbruikers tengevolge van storingen vaak zonder stroom zitten. Zodoende moet de bedrijfszekerheid zo groot mogelijk zijn, hetgeen echter niet mag leiden tot een duurdere vorm van energie dan de bestaande bronnen met een gelijke bedrijfszekerheid.

De electrische energie wordt onder hoge spanning getranspor-

HOOFDSTUK III

Overbrenging en verdeling van electrische energie: Hoogspanning - transformatie-stations - schakelmateriaal voor hoogspanning - keuze van de spanning - hoogspanningslijnen (bovengronds) - hoogspanningskabels (ondergronds) - beveiliging van hoogspanningsnetten.

Een der belangrijkste problemen van de electrotechniek is de overbrenging van electrische energie van het ene punt naar het andere. Electrische energie kan alleen dan economisch worden opgewekt, wanneer dit in het groot geschiedt. Hiervoor moeten dus centrales zijn, die de door hen opgewekte energie aan de verbruikers doorgeven.

De centrales kunnen thermische centrales zijn of hun energie aan waterkracht ontlenen. Je begrijpt, dat in die landen waar een massa waterkracht voorkomt (Zwitserland en de Scandinavische landen) veel waterkrachtcentrales zijn. Belangrijke thermische centrales (die hun energie aan steenkolen ontlenen) vind je vooral in het Ruhrgebied.

Ook Amerika heeft zijn waterkrachtcentrales. Een mooi voorbeeld hiervan zijn de centrales aan de rivier de Tennessee. Deze rivier heeft namelijk een zeer onregelmatige wateraanvoer, hetgeen tot voor enkele jaren tot gevolg had dat elk jaar geweldige overstromingen plaatsvonden. Men heeft toen de rivier afgedamd, waardoor in de eerste plaats de gronden geen overstromingen meer te duchten hadden, terwijl in de tweede plaats verscheidene waterkrachtcentrales ontstonden, die een geweldige electrische capaciteit bezitten, waardoor tot ver in de omstreken electrische energie kan worden gedistribueerd.

Ondanks de vele waterkrachtcentrales, die de wereld telt gaat dagelijks nog een fantastische hoeveelheid energie verloren. Al zal men er niet in slagen al deze energie ooit nuttig bruikbaar te maken, er zijn nog vele mogelijkheden. Een fantastisch plan bestaat b.v. om de Middellandse Zee van de Atlantische Oceaan af te sluiten. Het water in de Middellandse Zee verdampt nl. zeer snel en een constante stroom water bij Gibraltar zorgt vanuit de oceaan voor aanvulling. Zou men een dam kunnen bouwen van Gibraltar naar

stromen en spanningen. Bij spanningstransformatoren zijn de primaire wikkelingen parallel op de hoogspanning geschakeld, terwijl de secundaire spanning laag is. Op de secundaire wikkeling kan men behalve verscheidene voltmeters ook b.v. de spanningsspoelen van wattmeters schakelen. Aan de spanningstransformatoren worden bijzondere eisen gesteld wat betreft de transformatieverhouding, daar hiervan de meting in hoge mate afhankelijk is.

Bij stroomtransformatoren bestaat de primaire wikkeling uit slechts enkele windingen, terwijl de secundaire wikkeling naar verhouding veel windingen heeft.

Op spanningstransformatoren kan men in het algemeen alle apparaten aansluiten die men gescheiden wil houden van het hoogspanningsnet. Dit zijn b.v. ook frequentiemeters en synchroniseertoestellen voor het synchroniseren van machines alvorens deze parallel geschakeld worden. Het vergelijken van de fasen van twee netten is nl. secundair ook mogelijk al moet rekening worden gehouden met de gebruikelijke faseverschuiving bij het transformeren, die ongeveer 180° bedraagt.

De scheiding van het hoogspanningsnet maakt het mogelijk de meters op te stellen op plaatsen waar bedienend personeel komt. Op de meters zelf kan dus nooit hoogspanning komen. Zou een transformator doorslaan, waarbij een geleidende verbinding zou ontstaan tussen het hoogspanningsnet en het secundaire meternet, dan zorgt een beveiliging ervoor, dat het betrokken gedeelte geaard wordt dan wel dat de spanning automatisch wordt afgeschakeld.

overgang gebruik van de luchtlijn, waarbij aan beide zijden extra hoge mastconstructies moeten worden gemaakt.

Electriciteit onder hoge spanningen is niet gemakkelijk te beheersen. Afgezien van het feit, dat natuurlijk goede isolatoren moeten worden gebruikt zit men met het probleem, dat direct vonkoverslag optreedt, zodra de afstand tussen twee geleiders met een groot spanningsverschil te klein wordt. Dit kan b.v. het geval zijn tussen een fasedraad en een geaard onderdeel zoals een mast of een mantel van een schakelaar of transformator. Verder is het schakelen bij hoge spanningen niet zo eenvoudig. Men gebruikt voor het in- en uitschakelen in de hoogspanning meestal de zgn. olieschakelaars, waarvan de contacten geheel in een bak met olie zijn gemonteerd. Bovendien worden vaak inrichtingen aangebracht voor het uitblazen van een onderbrekingsvonk.

De olieschakelaars zijn voorzien van twee isolatoren, die de hoogspanning-voerende delen op voldoende afstand van de geaarde mantel moeten houden. Elke schakelaar schakelt in een der fasen van de draaistroomleiding.

Behalve deze olieschakelaars, waarmede men dus onder vermogen kan in- en uitschakelen gebruikt men scheidingsschakelaars. Deze zijn betrekkelijk licht uitgevoerd, en het is ook niet mogelijk onder belasting in of uit te schakelen. Zij dienen slechts om een deel van de installatie van de rest te scheiden, zodat dat deel gerepareerd of gecontroleerd kan worden. In de onderstations is alles dubbel uitgevoerd, zodat het bedrijf tijdens reparatie of vervanging kan doorgaan.

Natuurlijk is het niet doenlijk in de centrale de generatoren geschikt te maken voor de zeer hoge spanningen waarmee de electrische energie zal worden overgebracht. Het zou eenvoudig onmogelijk zijn de hoogspanning t.o.v. de geaarde machinedelen te isoleren. De spanning van de generatoren is daarom naar verhouding laag en bedraagt niet meer dan enkele duizenden volts. Dit schept vanzelfsprekend problemen, daar bij toenemend machinevermogen de ankerwikkelingen steeds dikkere staven vereisen.

De opgewekte energie wordt onmiddellijk omhoog-getransformeerd, tot de zeer hoge spanning van tientallen kilovolts, waaronder de energie de centrale zal verlaten. Transformatoren en

zijwaartse krachten wordt belast. Bovendien zijn er nog de eindmasten van leidingen, die natuurlijk zwaar in zijwaartse richting worden belast, zodat ze veel steviger moeten worden uitgevoerd dan gewone masten.

De draden worden gehangen aan kettingisolatoren, daar het onmogeijk is goede isolatoren uit één stuk te maken. Er zijn verschillende methoden voor het ophangen, waarbij de isolatoren verticaal omlaag kunnen hangen of in het verlengde van de draden. In het laatste geval zijn de draden bij de masten met elkaar doorverbonden met duidelijk zichtbare draden, die op voldoende afstand van de (geaarde) mast moeten worden gelegd.

Vroeger werd bij het kruisen door een luchtlijn van een weg of spoorweg een net onder de leiding aangebracht daar bij draadbreuk zeer gevaarlijke situaties konden ontstaan. Brak een draad, dan sloeg hij natuurlijk tegen de grond, maar het was niet zeker dat onder alle omstandigheden de maximaalrelais de draad zouden afschakelen, zodat het mogelijk was, dat de draad nog onder spanning stond. Tegenwoordig maakt men de hoogspanningslijnen zo, dat bij draadbreuk de spanning meteen van de bewuste draad afvalt, terwijl de gehele leiding wordt afgeschakeld. Zodoende is een netbeveiliging dus niet meer nodig en kunnen hoogspanningslijnen zonder gevaar over grote verkeerswegen en spoorwegen worden gespannen.

Behalve de luchtlijn, die het meeste voorkomt is het mogelijk onder zeer hoge spanningen electrische energie over kabels te brengen. Natuurlijk moeten voor overslag in de kabels speciale voorzorgen worden genomen. Daartoe wordt in de kabels olie onder druk gebracht, waartoe aan het uiteinde van de kabel een pompinstallatie nodig is. Deze kabels zijn zeer duur. Zij zijn echter niet zichtbaar en ontsieren het natuurschoon dus niet. Verder heeft men met kabels geen last van storingen die nogal eens bij luchtlijnen voorkomen : draadbreuk met als gevolg aardsluiting en vooral ook blikseminslag.

Onder bepaalde omstandigheden worden, ondanks de hoge kosten, korte kabelverbindingen toegepast. Dit gebeurt b.v. bij het kruisen van een rivier of kanaal, vooral wanneer hier grote schepen moeten passeren. In andere gevallen maakt men toch bij een rivier-

teerd zodra het gaat om tamelijk grote afstanden. Hoogspanning is officieel elke spanning boven 500 volt. De verdeelkabels in steden hebben vaak een spanning van 3000 volt (gekoppelde spanning). Kleine luchtleidingen hebben b.v. 10.000 volt (10 kV). De grotere hoogspanningslijnen werken bij 50 kV, terwijl in Nederland reeds verscheidene 150 kV lijnen in werking zijn. Een der nieuwste leidingen is die, welke een verbinding vormt tussen Den Haag en de centrale in Velsen. Van Den Haag naar Rotterdam loopt ondergronds een kabel van 150 kV. In het buitenland komen nog hogere spanningen voor: in Frankrijk b.v. 220 kV en in Amerika zelfs 380 kV.

De hoogspanningslijnen (luchtlijnen) worden op masten opgehangen; daarbij worden zij dubbel uitgevoerd. Er zijn dus steeds tweemaal drie draden te zien, die twee parallelle draaistroomleidingen vormen. Op deze wijze is het mogelijk wanneer een der draden breekt, waardoor een der aders van een lijn aardsluiting maakt, tijdelijk van de andere leiding gebruik te maken. Deze reserve houdt natuurlijk verband met de zojuist genoemde bedrijfszekerheid.

De ophanging van de luchtleidingen is een probleem op zichzelf. Zo moet je niet denken, dat de doorgang (de mate waarin de draden tussen twee opeenvolgende masten doorhangen) zo maar willekeurig gekozen wordt. Deze doorhang is nauwkeurig te berekenen. Is de doorhang niet groot genoeg, m.a.w. zijn de draden te strak gespannen, dan zullen zij te veel op trek worden belast. Is de doorhang te groot, dan zullen zij te dicht bij de grond komen en zijn er weer méér masten nodig, hetgeen de installatie onnodig duur maakt.

De masten zelf worden als het ware naar beneden tegen de grond gedrukt, zodat zij alleen hoeven te dragen. Natuurlijk moeten zij bestand zijn tegen zijwaartse krachten, b.v. bij wind. Zijwaartse trek tengevolge van de draden ondervinden zij echter niet, omdat de krachten in zijwaartse richting van de draden aan beide zijden van de mast elkaar opheffen. Dit geldt natuurlijk alleen voor die masten waarbij de leiding aan beide zijden in één richting loopt. Vandaar dat men een leiding zoveel mogelijk recht-toe-recht-aan op het doel bouwt. Hier en daar komt het echter voor, dat een knik in de leiding moet worden gemaakt, zodat een dergelijke mast wel degelijk op

op een ongestoorde fase overslaan, waardoor kortsluiting tussen twee fasen ontstaat. In alle gevallen kunnen golfverschijnselen optreden, die, zoals we reeds zagen soms schadelijk kunnen zijn voor de isolatie van de apparatuur, die met het net is verbonden.

Beveiligingen tegen overspanning.

Op verschillende wijzen kunnen dus in een hoogspanningslijn overspanningen ontstaan, waartegen beveiliging moet worden toegepast. Tegen blikseminslag kunnen de apparaten, die met de lijn in verbinding staan, d.w.z. de schakelaars en transformatoren aan de uiteinden van de lijn, worden beveiligd door middel van hoornbliksemafleiders. In fig. 59 zie je schematisch deze beveiliging voorgesteld. Normaal is de afstand tussen de hoorns (waarvan één aan aarde en de andere met de draad is verbonden) zo groot, dat geen overslag mogelijk is. Indien om welke reden ook de spanning aan het einde van de leiding, dus op de linkerhoorn, te hoog oploopt zal overslag optreden naar aarde. Dit geschiedt geheel onderaan, waar de afstand tussen de hoorns zo klein mogelijk is. Door verwarming van de lucht stijgt de vonkoverslag een beetje en er ontstaat een gedeeltelijk gesloten winding, waarvan een deel gevormd wordt door de vonkoverslag, maar niettemin dus een stroom voert. Nu zal een gebogen geleider waar een stroom door vloeit steeds trachten een zo groot mogelijk oppervlak in te nemen, hetgeen te danken is aan het magnetisch veld, dat zich om de geleider vormt tengevolge van de electrische stroom. Daar de vonkoverslag vrij is verder te stijgen zal dit geschieden, waarbij de luchtweg van de overslag steeds groter wordt. Is dus de oorzaak van de overspanning verdwenen, m.a.w. betrof het slechts een kortstondige overspanning, dan zal een ogenblik komen, dat de luchtweg zo groot is, dat de vonk niet meer kan bestaan en dus dooft. De hoornbliksemafleider heeft dus het voordeel dat hij de apparatuur beveiligt, maar dat de storing (het aarden van de draad) zo kort mogelijk duurt.

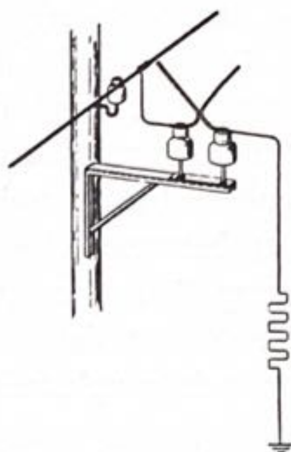


Fig. 59

telkens de spanningsgolf in grootte toeneemt. Het steile front van de lopende golf veroorzaakt zeer gevaarlijke overspanningen die hier en daar de isolatie van aan de leiding aangesloten apparatuur kan beschadigen, waardoor verdere overslag ontstaat.

Bij statische atmosferische ladingen trekt een geladen wolk (b.v. positieve lading) een hoeveelheid negatieve lading naar de plaats in de leiding aan (fig. 58). Uit de leiding komt dan een even grote negatieve lading door weglekken in isolaties vrij. Wanneer de wolk zich nu boven de leiding ontlaadt, verdwijnt eensklaps de lading en komt de geïnfluenceerde lading ter plaatse in de leiding weer vrij. Dit geschiedt dus plotseling, hetgeen tot gevolg heeft, dat naar beide richtingen in de leiding een lopende golf ontstaat, die zich met de lichtsnelheid voortplant.

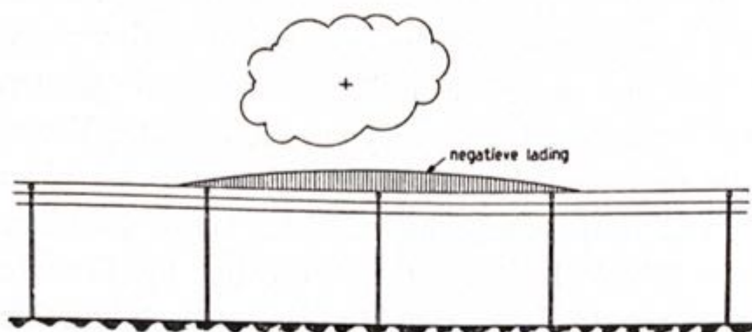


Fig. 58

Erger is het wanneer een onweerswolk zoveel lading kan aantrekken dat een isolator ter plaatse doorslaat. Op hetzelfde ogenblik zal dan de spanning op die plaats aanmerkelijk dalen en dit veroorzaakt een golf, die zich naar beide richtingen voortplant. Deze golven hebben steile flanken en zijn daarom voor andere isolaties gevaarlijk. Men noemt dit verschijnsel indirecte blikseminslag.

Bij de directe blikseminslag zullen eveneens ter plaatse isolatoren vernield worden; het is niet mogelijk ze hiertegen te beveiligen.

Bij luchtlijnen komt vaak aardsluiting voor door electrische fouten in isolatoren (fouten in het porselein), blikseminslag, draadbreuk en soms door vogels. Door aardsluiting kunnen minder prettige bijverschijnselen ontstaan. Zo kan een andere fase, die dus ongestoord is een hogere spanning aannemen t.o.v. aarde, nl. de gekoppelde spanning in plaats van de fasespanning. De lijnen zijn echter zo gemaakt, dat zonder verdere vernielingen de isolatoren tegen deze verhoogde spanning bestand zijn. Er kan ook een lichtboog

schakelaars kunnen daarbij hetzij in speciale gebouwen, hetzij in de open lucht worden opgesteld. Men beschikt over verzamenrails, waardoor het mogelijk is verscheidene machines parallel te laten werken. Aan de rails worden de verschillende afgaande lijnen verbonden, natuurlijk onder tussen-schakeling van de schakelaars.

Aan het andere einde van de lijnen zijn weer transformatoren aangebracht, die de spanning omlaag-transformeren, b.v. tot 3000 V. Onder deze spanning wordt dan een stad gevoed, waarbij de kabels ondergronds zijn aangebracht. Op verschillende punten in de stad zijn transformatorstations geplaatst, die de 3000 V omzetten in 380 V, die dan voor de voeding van de verbruikers kan dienen. Voor huisverlichting gebruikt men één der fasen, waardoor de spanning in huis 220 V bedraagt (zie hoofdstuk 1). Grotere verbruikers levert men een driefase-aansluiting om te ongelijkmatige fasebelasting te voorkomen. Zeer grote verbruikers zoals fabrieken, e.d. krijgen de energie onder 3000 V toegevoerd en hebben een apart transformatorstation. De grootte van dit transformatorhuisje varieert natuurlijk naar verhouding van de grootte van het bedrijf; het kan een heel huisje zijn maar ook wel een gewone metalen kast.

Overspanningen in hoogspanningslijnen.

Zeer belangrijk zijn de zgn. overspanningen in hoogspanningslijnen en hun bestrijding. Overspanningen kunnen ontstaan door schakelverschijnselen, blikseminslag, aardsluiting, enz. Zij ontstaan in het algemeen wanneer een electrische of magnetische toestandverandering in de installatie optreedt. Je kunt dat het beste vergelijken met golven in water. Wanneer je een bak met water wankel opstelt, dan zal er niets gebeuren zolang het water in rust is. Maak je in het water kleine golven, dan kan dat tot gevolg hebben, dat de bak gaat wiebelen, waardoor de golven versterkt kunnen worden. Of dit al of niet gebeurt zal afhangen van de afmetingen van de bak en van zijn opstelling. Zo is dat ook met een hoogspanningsnet. Ontstaat door een schakeling of blikseminslag een toestandverandering waardoor een spanning zich met grote snelheid (lichtsnelheid) langs de leiding voortplant, dan zal bij botsing tegen een weerstand (of zelfinductie van een spoel) terugkaatsing volgen. Dit kan in een leiding zelfs enige keren achter elkaar aan beide einden optreden, waarbij

De spanning wordt dan of eerst tot 3000 V omlaag-getransformeerd òf ook wel direct tot 380/220 voor direct verbruik.

Vaak bouwt men het hoogspanningsnet zodanig dat een ringnet ontstaat. Voeding van elk punt is dan mogelijk langs twee wegen, hetgeen zijn nut kan hebben bij grote storingen. Bovendien, en dat is belangrijker, is het mogelijk de verliezen in het net lager te houden.

Van groot belang is het koppelen van de verschillende centrales onderling. Dit leidt tot een veel economischer en bedrijfszekerder werking. Zoals wij reeds eerder zagen, kan electrische energie alleen economisch opgewekt worden wanneer dat in het groot gebeurt. Heeft men dus vele kleinere centrales, dan lijkt dat minder economisch, doch dit hoeft niet zo te zijn, want de verliezen in de netten spelen ook een belangrijke rol. Uit dàt oogpunt zou het weer beter zijn de centrales te verdelen over verschillende punten van het net.

Daar er nu eenmaal vele centrales bestaan ligt het voor de hand deze onderling te koppelen waardoor het mogelijk wordt dat de ene centrale energie aan de andere kan leveren wanneer de eerstgenoemde op een bepaald moment tekort komt. De voordelen van koppelen zijn: a. de centrales behoeven veel minder reserve-apparaten te hebben, daar bij een storing energie kan worden geleverd door een of meer andere centrales; b. naarmate een groter gebied wordt bestreken zal de bevolkingssamenstelling meer variëren. Gekoppelde centrales bestrijken tezamen een veel groter gebied dan de centrales op zichzelf. De belasting van de centrales van uur tot uur wordt daardoor gelijkmatiger.

Het laatstgenoemde voordeel is wel zeer groot. Een centrale streeft altijd naar de ideale, gelijkmatige belasting gedurende de 24 uur van het etmaal. Want als deze belasting zeer laag is moeten de machines toch blijven draaien, hetgeen zeer oneconomisch is en weinig geld in het laatje brengt, terwijl alle vaste kosten blijven drukken. De capaciteit van de centrale moet echter berekend zijn op het maximum te leveren vermogen.

In werkelijkheid is de belasting van een centrale allerminst gelijkmatig. Natuurlijk is het verbruik des nachts gering, althans in vergelijking tot de maximum belasting. Of en wanneer er piekuren zullen ontstaan hangt van vele factoren af, b.v. van de aard van de

tegelijk op het juiste moment de bij te schakelen machine op de rails schakelt.

Bij grote machines zal men volt- en ampèremeters willen hebben voor elke fase en registrerende voltmeters en kilowattmeters om doorlopend het gedrag van de machine te kunnen nagaan.

De meters mogen natuurlijk niet met de eigenlijke hoogspanning in aanraking komen, omdat zij dan niet geplaatst zouden kunnen worden op een schakelbord vanwege het gevaar voor het bedienend personeel. Bovendien gaat men geen voltmeter maken, die rechtstreeks met de hoogspanning wordt verbonden, omdat dit uit constructief oogpunt voor de meter erg moeilijk zou zijn! Men gebruikt dan ook voor het meten van spanning spanningstransformatoren. Deze kunnen tussen een fase en aarde worden aangesloten en hebben aan de hoogspanningskant natuurlijk veel windingen; aan de laagspanningskant hebben zij er weinig en een lage spanning. Daar de transformatieverhouding nauwkeurig bekend is kunnen de meters, die feitelijk op een lage spanning zijn aangesloten direct in de hoge spanning worden geijkt.

Voor het meten van stromen maakt men gebruik van stroomtransformatoren, die de hoge stromen omzetten tot een naar verhouding bekende lagere stroomsterkte. Stroomtransformatoren worden in vele vormen en uitvoeringen gemaakt.

Op stroom- en spanningstransformatoren kunnen ook de overeenkomstige spoelen van verbruiksmeters en frequentiemeters worden aangesloten.

De ligging van de hoogspanningslijnen hangt geheel af van de plaatselijke omstandigheden. In het algemeen zal men de lijnen vanaf de centrale laten lopen naar punten waar veel verbruik is. Dat zijn in het algemeen grote steden, maar wanneer in een middelmatig grote stad veel industrie is, kan zo'n stad ook in aanmerking komen voor een onderstation.

Vanaf de centrale gaan hoogspanningslijnen van b.v. 50 kV naar enkele punten in een provincie. Hier worden onderstations gebouwd, waar de spanning van 50 kV tot b.v. 10 kV omlaag wordt getransformeerd. Rondom deze onderstations verdeelt men de energie met verscheidene 10 kV-lijnen naar verschillende punten in de buurt.

Beveiliging tegen lopende golven, in het bijzonder met steile flanken, geschiedt voornamelijk met Peterson-spoelen. Dit zijn spoelen, die slechts enkele windingen hebben en voor de normale stroomdoorgang geen bezwaar vormen. Indien een zeer steile golfflank aankomt van links (fig. 60) dan zal geen terugkaatsing plaats hebben, maar zal de golf in de spoel worden gedempt.

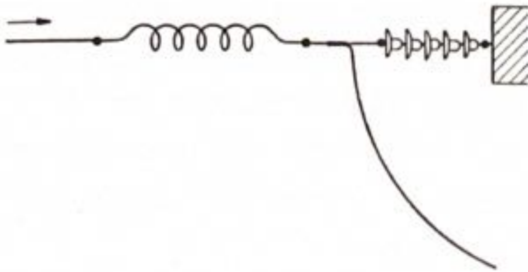


Fig. 60

Je zult misschien niet begrijpen, dat de golf niet gedempt wordt door de zelfinductie van de transformator. In de eerste plaats betekent dat misschien beschadiging voor de eerste windingen van de transformator, omdat overslag t.o.v. de geaarde kern kan ontstaan. In de tweede plaats is de zelfinductie van de transformatorspoel niet juist voor het dempen van dergelijke golven. Een en ander is te vergelijken met een tennisbal, die je op een betonnen vloer laat vallen. Hij kan niet verder, maar kaatst terug. Wil je nu bereiken, dat de bal niet verder valt, maar ook niet terugkaatst, dan laat je op de vloer een laag water komen, waardoor de terugkaatsing van de bal zal worden gedempt.

Meetinstrumenten in de hoogspanning.

Natuurlijk is het ook aan de hoogspanningszijde nodig de verschillende metingen te verrichten, die je ook aan de laagspanningszijde zou uitvoeren. Zo moet je spanning en stroom kunnen nagaan.

Om te beginnen moet je aan de machines kunnen meten, wat zij afgeven en of zij onder de juiste bedrijfscondities werken. In de eerste plaats zijn daarvoor nodig een voltmeter, een ampèremeter en een frequentiemeter of een toerenteller. Moet een draaistroomgenerator parallel kunnen werken met andere generatoren, dan zal men bovendien een apparaat voor synchronisatie moeten hebben.

Draaistroomgeneratoren kunnen nl. wel parallel werken, maar dan moeten zij ingeschakeld worden op het ogenblik dat hun fasen gelijk zijn! Het bepalen van deze fase kan op allerlei manieren geschieden, b.v. met lampen, meters of met een automaat, die

HOOFDSTUK IV

Electrische meetinstrumenten: Draaispoelmeters - weekijzermeters - kruisspoelmeters - electrodynamische meters - thermische meters - inductie- en Ferrarismeters - Kilowattuurenmeters - Cos φ-meters - tongenfrequentiemeters - wijzerfrequentiemeters - draaiveldrichtingaanwijzers - electrostatische voltmeters.

In de electrotechniek, waarin wij hoegenaamd niets rechtstreeks met onze zintuigen kunnen waarnemen, spelen de meetinstrumenten een rol, die belangrijker is dan in welk ander vak ook. Er zijn zeer veel verschillende soorten meetinstrumenten en -apparaten, maar vaak is een meetmethode terug te brengen tot een der grondprincipes, zodat het van belang is deze te kennen. We zullen daarom eerst de belangrijkste instrumenten nader bekijken.

a. De draaispoelmeter.

Een belangrijke plaats onder de meetinstrumenten neemt de draaispoelmeter in. Dit is een meter met vele voordelen boven andere typen en die dan ook zeer vaak gebruikt wordt.

Het principe van de draaispoelmeter zie je in fig. 61, waar een schematische voorstelling van het instrument is weergegeven. Een permanente magneet zorgt voor een sterk magnetisch veld. In dit veld bevindt zich een spoeltje met enkele windingen. Dit spoeltje (draaispoel) is zodanig gemonteerd, dat het kan draaien, terwijl het in zijn geheel toch in het veld blijft. De draaiing wordt tegengewerkt door middel van een tweetal veertjes. Het ene veertje werkt in de ene richting tegen, het tweede in de andere. Je begrijpt, dat er een stand van het spoeltje bestaat, waarbij de krachten der beide veertjes elkaar net opheffen; in deze stand zal het spoeltje gaan staan, wanneer het instrument niet is aangesloten op een stroombron.

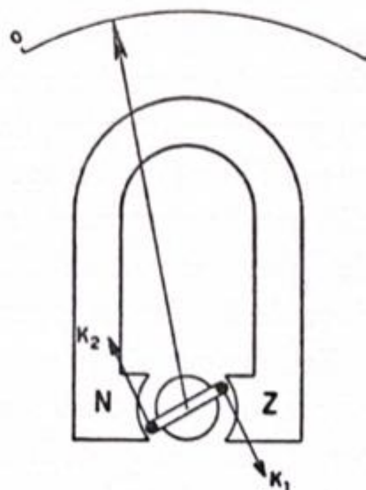


Fig. 61

Aan het spoeltje is een wijzer bevestigd, die bewegen kan (als

luchtlijnen zijn echter wat hun mastconstructie betreft al ingericht voor 400 kV, zodat in de naaste toekomst ombouw tamelijk gemakkelijk is.

Via het koppelnet kan Nederland b.v. electrische energie aan Zwitserland leveren, hetgeen al gebeurt, terwijl Nederland electrische energie uit Duitsland betrekt. Natuurlijk moeten nog deviezenmoeilijkheden opgelost worden, die oorzaak zijn, dat er tot nu toe veel minder energie internationaal is uitgewisseld dan in verband met de capaciteiten van het bestaande koppelnet mogelijk was.

bevolking (al of geen industrie, enz.), van de tijd van het jaar, enz. 's Morgens vindt men een vrij hoge belasting, al is deze nog lang niet gelijk aan het maximum; deze belasting wordt veroorzaakt door de industrie. Van 12 tot 2 uur zal een daling van de belasting ontstaan, doordat de fabrieken niet alle tegelijk een half uur of een uur pauzeren. Des middags vindt men weer de verhoogde belasting, die ook 's morgens aanwezig was. Wat er tegen het einde van de middag zal gebeuren hangt ervan af of het winter of zomer is. Is het zomer, dan zal de belasting aan het einde van de middag afnemen, omdat de fabrieken sluiten. Later op de avond stijgt de belasting weer tengevolge van het inschakelen van de huis- en straatverlichting.

Des winters echter is de toestand heel anders. Tegen het einde van de middag stijgt de belasting nog hoger, doordat huis- en straatverlichting worden ontstoken vóórdat de fabrieken sluiten. Dit wordt dan nog verergerd doordat in de grote steden de kantoren hun verlichting aansteken. Er ontstaat nu een gevaarlijke piektijd, die niet zo lang hoeft te duren, maar die toch de stroomlevering in gevaar brengt, want als de centrales het vermogen niet kunnen leveren moeten kabels worden afgeschakeld. Kortstondige overbelastingen zijn ongetwijfeld toelaatbaar, al zal op de duur de apparatuur daaronder te lijden hebben. Dezelfde gevaarlijke piektijd kan natuurlijk ontstaan in de morgenuren vóór zonsopgang.

Na de oorlog heeft men in Europa een algemeen gebrek aan capaciteit. Gedeeltelijk komt dat door vernieling van centrales, maar voor een groot deel ook door de sterk gestegen behoefte. De centralecapaciteit kan echter niet snel genoeg worden vergroot, doordat wij bepaalde grondstoffen (staal en cement) tekort komen, terwijl de speciale apparatuur, die alleen bepaalde landen kunnen leveren (b.v. de Ver. Staten) alleen op lange termijn leverbaar is. Hierdoor en ook met het oog op de toekomstige samenwerking van de verschillende Westeuropese landen besteedt men zijn volle aandacht aan de onderlinge koppeling van de electrische centrales, niet alleen in Nederland, maar ook internationaal. Bij het bouwen van het internationaal koppelnet ontstaan weer moeilijkheden op het gebied van materiaalleveringen. Zo zijn er b.v. nog niet voldoende isolatoren voor zeer hoge spanningen leverbaar. Sommige 220 kV-

zodat $$\alpha = \frac{a}{b}\, I = c.I \qquad (3)$$

(hierin is $\frac{a}{b}$ vervangen door een nieuwe constante c; de grootte van c interesseert ons niet erg, alleen dat c constant is). We zien dus dat de draaiingshoek α alleen afhangt van de stroom I *en daarmee evenredig is,* zodat voor een stroom die p maal zo groot is als een andere stroom, de hoek, waarover de wijzer draait ook p maal zo groot is als de andere hoek (p = een willekeurig getal).

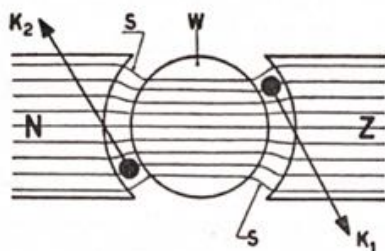


Fig. 62

Laten wij nu eens de ligging van de draaispoel in het veld bekijken. In fig. 62 is dit gedeelte van de meter schematisch voorgesteld. Aan de binnenkant van het spoeltje heeft men een stuk ijzer W aangebracht. Dit stukje draait niet met de spoel mee, maar is aan de eigenlijke magneet bevestigd. Het doel hiervan is in de eerste plaats te zorgen dat de luchtspleet zo klein mogelijk blijft. Inderdaad kan het spoeltje nog vrij draaien en bestaat de luchtweg voor de magnetische krachtlijnen alleen nog maar uit de twee spleetjes. De reden, dat men de luchtweg zo klein wil houden is natuurlijk dat men een uiterst sterk veld wil hebben. De draaiende krachten op het spoeltje waren immers 0,1 B.I.l.N, zodat het zaak is voor een zeer grote kracht te zorgen waardoor B zo groot mogelijk wordt. Hebben wij zo'n grote kracht, dan wil dat zeggen, dat we het spoeltje tegen de veerkrachten in kunnen laten draaien met een zo *klein mogelijke stroom,* zodat de meter dan in verhouding zeer gevoelig wordt. De veldsterkte B zal groot zijn als de weerstand voor krachtlijnen klein is en, daar lucht voor het magnetisch veld veel weerstand betekent is het zaak te zorgen voor veel ijzer en weinig lucht.

De aanwezigheid van de kern W heeft nog een ander voordeel. In fig. 62 zijn ook getekend de krachtlijnen van het veld. Duidelijk blijkt, dat zij door de kern worden aangetrokken, hetgeen komt doordat zij bij het bereiken van de luchtspleetjes trachten zo snel mogelijk weer in ijzer te komen. Daardoor ziet men de krachtlijnen in de luchtspleet alle min of meer naar het midden van de spoel (en van de kern W) wijzen. Dit heeft dan weer het voordeel,

want B is de sterkte van het veld, dat constant is voor alle standen van de draaispoel en l is de lengte van de geleider, voor zover deze zich in het veld bevindt; het is hier dus de lengte van de windingszijde. Het blijkt, dat die kracht K alleen afhankelijk is van de stroomsterkte I en daarmede recht evenredig is.

Hebben wij, zoals bij een draaispoel, meer dan één winding, dan moet men rekening houden met even zoveel krachten K als er windingen zijn. De krachten K_1 en K_2 zijn dus gelijk van grootte en gelijk aan 0,1 B.I.l.N, waarin N het aantal windingen is. Daar het aantal windingen van de draaispoel constant is, blijken de krachten K_1 en K_2 recht evenredig te zijn met de stroomsterkte I en nergens anders meer van afhankelijk.

Aan de andere kant moeten wij even praten over de tegenwerkende krachten van de veertjes. Deze zijn recht evenredig met de hoek waarover zij worden verdraaid. Het is nl. zo, dat als je een veer uitrekt, ze een tegenkracht oplevert, die evenredig is met de uitrekking — echter tot aan de veergrens. Deze veergrens is overschreden, wanneer na het ontlasten van de veer deze niet meer in haar oorspronkelijke stand terugkeert. Zo zouden wij de draaiveertjes van de meter wel zover kunnen verdraaien, dat, na loslaten, zij niet meer in hun oorspronkelijke stand terug kwamen.

We hebben dus twee dingen:

a. het draaiend koppel is evenredig met de stroom, dus

$$M_d = a.I \qquad (1)$$

b. het tegenwerkend koppel is evenredig met de draaiingshoek, zodat

$$M_t = b.\alpha \qquad (2)$$

waarin M_d = het draaiend koppel;
M_t = het tegenwerkend koppel;
a = een constante (waarin B, l en N);
b = een andere constante (o.a. afhankelijk van de elasticiteit van de veren).

We hebben al gezegd, dat het spoeltje stilstaat, wanneer de twee koppels elkaar opheffen, dat is dus wanneer $M_d = M_t$. Uit de formules (1) en (2) blijkt dan dat

$$a.I = b.\alpha$$

het spoeltje verdraait) voor een geijkte schaalverdeling. De neutrale stand van de draaispoel is zodanig, dat in die stand de wijzer van de meter op nul staat.

Wordt nu een stroom door de windingen van het spoeltje gestuurd, dan zal op elke winding een kracht worden uitgeoefend, omdat deze zich in het magnetische veld bevindt. De kracht wordt uitsluitend uitgeoefend op dat deel van de windingen, dat loodrecht op de krachtlijnen van het veld ligt. In fig. 61 zie je het spoeltje in doorsnede. Wanneer de stroom in de linker-windingszijden naar ons toe komt, dan zal hij in de rechter-windingszijden van ons afgaan. Daar voor beide spoelzijden de richting van het magnetisch veld gelijk is, zullen de krachten die op de rechter- en linker-spoelzijden worden uitgeoefend tegengesteld gericht zijn. Voor de windingen van de linkerspoelzijde zijn zij alle naar boven gericht in de tekening, en zij vormen samen de totale kracht K_2 op de linkerspoelzijde. Op dezelfde manier ontstaat op de rechterspoelzijde de kracht K_1. Samen geven deze krachten aan de spoel een koppel, waardoor de spoel met de klok mee gaat draaien.

Op de spoel werken echter nog de krachten van de beide veertjes. Deze trachten de spoel in de neutrale stand te houden, hetgeen niet meer mogelijk is, omdat het rechtsdraaiend koppel erbij gekomen is. De spoel draait dus rechtsom en spant de veertjes, die, hoe meer zij gespannen worden, des te groter tegenwerkend koppel gaan vormen. Er komt nu een ogenblik, dat de tegenwerkende krachten gelijk zijn aan de draaiende krachten K_1 en K_2 en op dat ogenblik komt de spoel weer tot stilstand. De wijzer geeft dan de sterkte van de door de draaispoel lopende stroom aan.

Een der voordelen van de draaispoelmeter is, dat de schaal lineair wordt, d.w.z. dat als we een stroom I_2 door de spoel sturen, die b.v. 2 maal zo groot is als een andere stroom I_1, de wijzer van de meter voor I_2 ook een tweemaal zo grote hoek zal verdraaien als voor I_1. Inderdaad is de verdraaiing van de spoel evenredig met de stroomsterkte, hetgeen gemakkelijk als volgt kan worden beredeneerd.

Zoals we weten is de kracht die een rechte geleider ondervindt wanneer hij, in een magnetisch veld geplaatst, een stroom geleidt, gelijk aan $K = 0{,}1\ B.I.l$ (zie blz. 18). Hierin is $0{,}1\ B.l$ constant,

Het spreekt vanzelf, dat men getracht heeft de voordelen van de draaispoelmeter ook te gebruiken voor het meten van wisselstromen.

b. Wisselstroommetingen met de draaispoelmeter.

Bij het meten van wisselstromen en -spanningen met een draaispoelmeter is het noodzakelijk de wisselstroom, die door de meter moet vloeien, eerst gelijk te richten. Dit kan in de eerste plaats geschieden door middel van een of meer droge gelijkrichtcellen. Deze cellen berusten op de eigenschap, dat een metaal, dat bedekt is met een laag oxyde de electrische stroom alleen in één richting doorlaat (nl. van het oxyde naar het metaal). Meestal neemt men als metaal koper en bedekt dit met een laag koper-oxydul. Volkomen gelijkrichten kunnen deze cellen evenwel niet, maar men bereikt toch, dat de stroom veel gemakkelijker van het koper-oxydul naar het koper gaat dan omgekeerd. Het schemateken voor een dergelijke gelijkrichtcel is in fig. 64 afgebeeld. Met één dergelijke cel verkrijgt men natuurlijk enkelfasige gelijkrichting. De stroom, die door de draaispoel vloeit, ziet er dus grafisch uit als in fig. 65b. De uitwijking van de meter komt dan overeen met de gemiddelde waarde van deze stroom.


Fig. 64

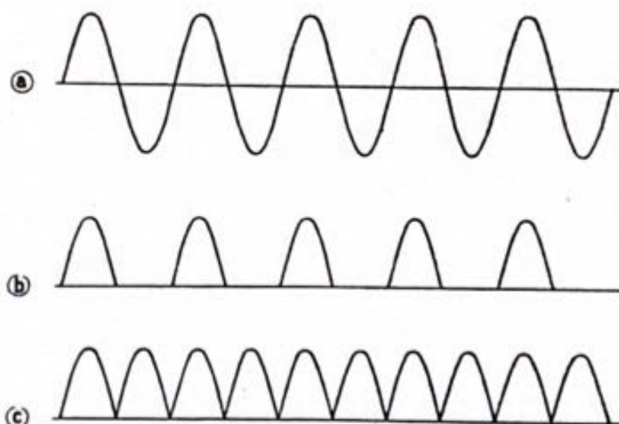


Fig. 65

Een draaispoelmeter kun je beschouwen als een instrument, dat door de traagheid van de spoel met wijzer snel veranderende stromen van moment tot moment optelt (integreert), waardoor de gemiddelde waarde wordt aangewezen.

Nu is de gemiddelde waarde van een enkelfasig gelijkgerichte stroom gelijk aan $1/\pi$ maal de topwaarde, dat is ongeveer 32%. Had de oorspronkelijke wisselstroom dus een amplitude van b.v.

het instrument achteruit gaat; het is beslist ontoelaatbaar dat de demping tot gevolg zou hebben dat de meter een verkeerde waarde aanwijst. Daarom is het aanbrengen van een goede dempingsinrichting geen gemakkelijke taak.

De draaispoelmeter kan nu gebruik maken van wervelstroomdemping, en dat is een van zijn voordelen. De werking berust op het principe dat in een geleider, die bewogen wordt in een magnetisch veld (loodrecht op de richting der krachtlijnen) een e.m.k. wordt opgewekt. Deze e.m.k. kan zelf niets doen, maar verbinden we de uiteinden van de geleider met elkaar, dan zal de e.m.k. een stroom opwekken, die de oorzaak van zijn ontstaan tracht tegen te werken (wet van Lenz). Deze oorzaak is uiteindelijk het feit dat de geleider beweegt, zodat de stroom eigenlijk de geleider in zijn beweging remt! Deze wervelstroomdemping wordt bij de draaispoelmeter op de volgende manier bereikt. Het spoeltje is gemonteerd op een aluminium raampje (fig. 63). Dit raampje is natuurlijk niet verder met de stroomkring verbonden, maar het vormt wel als het ware een winding, die echter ook is kortgesloten. Zodra nu de spoel gaat draaien ontstaat in het raampje een e.m.k. en daardoor een stroom, die de draaiing tracht tegen te werken. Het slingeren wordt daardoor aanmerkelijk gedempt. Tevens wordt na het afschakelen van de te meten stroom of spanning het terugvallen van de wijzer gedempt, zodat hij niet met een botsing tegen de linker stuitpen aankomt. Deze wervelstroomdemping heeft het voordeel, dat zij geen invloed kan hebben op de aanwijzing, omdat zij niet werkzaam is wanneer de wijzer stilstaat; ook heeft de demping geen invloed op de gevoeligheid van het instrument, daar als het ware geen enkel extra onderdeel aan het systeem behoeft te worden aangebracht.

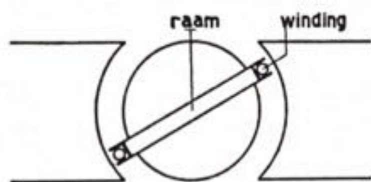


Fig. 63

Tegenover de voordelen van de draaispoelmeter staat het nadeel dat de meter alleen geschikt is voor het meten van gelijkstromen. Dat komt natuurlijk, doordat de stroomrichting de richting van de draaiende krachten op het spoeltje bepaalt.

dat de spoelzijden zich steeds loodrecht op de krachtlijnen bewegen. Dit zou niet het geval zijn geweest wanneer de krachtlijnen in de tekening horizontaal hadden gelopen. De spoelzijden beschrijven immers een deel van een cirkel! Dat de spoelzijden nu bewegingen maken loodrecht op de richting van de krachtlijnen is dáárom van belang omdat alleen dan de kracht 0,1 B.I.l.N te bereiken is. Anders zou die kracht kleiner zijn, en we trachten immers de kracht zo groot mogelijk te maken. Dit radiaal veld is een bijkomstig voordeeltje, de hoofdzaak is, dat de veldsterkte B in de luchtspleetjes zo groot mogelijk is met de kern W.

Nog een voordeel van de draaispoelmeter is, dat hij weinig last ondervindt van vreemde velden. Dat zijn magnetische velden, die van buiten komen. Wanneer je in de buurt van een meter een magneet hebt gelegd, dan zullen de krachtlijnen van die magneet ook in de luchtspleet van de draaispoelmeter komen en daar het veld iets veranderen. Daardoor zou de ijking van de meter niet meer kloppen en je metingen fout zijn. Doordat de veldsterkte in de luchtspleetjes van de meter zo groot is door de eigen magneet, zal het niet zo gauw gebeuren, dat een vreemde magneet voldoende sterkte heeft om het veld in die luchtspleetjes merkbaar te veranderen.

De gevoeligheid van de draaispoelmeter is veel groter dan van alle andere meetinstrumenten, een eigenschap die in de zwakstroom van belang kan zijn.

Tenslotte moeten we het nog hebben over de demping, wat voor alle instrumenten van belang is. Wanneer je een meter aansluit op een stroombron, dan zal de wijzer uitslaan. De wijzer gaat „door zijn vaart" verder dan de aan te wijzen stroomwaarde. De tegenkrachten der veertjes verzetten zich hiertegen, waardoor de wijzer weer terugdraait tot iets lager dan de aan te wijzen waarde; nu verzet zich hiertegen de draaiende kracht op het spoeltje. Zo blijft de wijzer (met het spoeltje) enige tijd om de juiste waarde slingeren, totdat dit zo klein geworden is dat de wijzer stilstaat op de juiste aan te wijzen waarde. Dat slingeren kan voor het vlot meten van spanningen en stromen hinderlijk zijn en om het te voorkomen moet een demping worden aangebracht. Het is natuurlijk prettig wanneer de demping niet tot gevolg heeft dat de gevoeligheid van

die men voor de draadjes c en d gebruikt. Voor de metalen koper en constantaan bedraagt dat 45 μV per graad Celsius. Dat is dus, zoals je ziet, niet veel. De thermo-e.m.k. zal evenredig met de temperatuur groter worden, mits men maar beneden ongeveer 230° blijft. Daar de uitwijking van de draaispoelmeter lineair verandert met de aangelegde spanning, zal tenslotte de uitwijking van de meter kwadratisch afhankelijk zijn van de stroomsterkte.

Wil je nu de thermo-omvormer uiterst gevoelig maken, dan zal het zaak zijn te zorgen, dat de temperatuur voor een bepaalde warmte-ontwikkeling zo groot mogelijk wordt, en te voorkomen, dat warmte wordt weggevoerd, door straling, stroming of geleiding. Daarom bouwt men het „kruis", zoals de combinatie van draadjes vaak wordt genoemd, in een luchtledige glazen ballon. De warmteafvoer door stroming van lucht is daardoor niet meer mogelijk. De warmteafvoer door straling voorkomt men door de ballon in een zwart bakelieten doosje te plaatsen.

Een groot voordeel van de thermo-omvormer in samenwerking met een draaispoelmeter is, dat het instrument vrijwel frequentieonafhankelijk is, hetgeen b.v. voor metingen in de hoogfrequenttechniek van groot belang is. Alleen bij zéér hoge frequenties ontstaan fouten tengevolge van impedantieveranderingen van de schakeling.

Een ander voordeel van de meter is, dat bij overbelasting de reparatie tamelijk eenvoudig verloopt. Het thermokruis (dat met 4 pennen, net als een oude radiobuis, is uitgevoerd) behoeft slechts te worden verwisseld. Dit in tegenstelling met de hittedraadmeter, die wij nog zullen bespreken.

c. Vergroten van het meetbereik van een draaispoelmeter.

Het is mogelijk het meetbereik van een draaispoelmeter te vergroten. Heb je, zoals in fig. 68a is getekend, een draaispoelmeter met een spoelweerstand van 100 ohm en een volle uitslag bij 1 mA, dan zal de spanning, die je aan de klemmen van de meter moet schakelen om volle uitslag te krijgen bedragen I.R $= 1 \times 100$ m.V (de stroom is in mA). De draaispoelmeter is dus een stroommeter met een bereik van 1 mA of een spanningsmeter met een bereik van 100 mV. Schakel je in serie met de meter een weerstand R_V (voor-

door de gelijkrichtende werking afneemt, daar de stroom hoe langer hoe meer in de sperrichting gaat vloeien.

Voor het meten van wisselstromen en -spanningen met hogere frequenties kan men gebruik maken van de draaispoelmotor, waarbij de gelijkrichting geschiedt met behulp van een thermo-omvormer. Dit is inderdaad een omvormer, daar het instrument van de wisselstroom een gelijkspanning maakt, die in grootte afhankelijk is van de stroomsterkte. Deze spanning kan gemakkelijk door een draaispoelmotor gemeten worden, zodat na ijking ook de wisselstroom bekend is.

In principe bestaat de thermo-omvormer uit een meetdraad (fig. 67a-b), waar de wisselstroom door vloeit. De meetdraad is zo gemaakt, dat hij door de wisselstroom tot gloeien wordt gebracht.

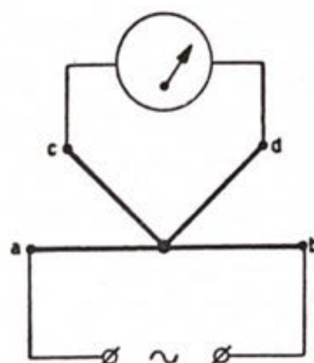


Fig. 67

Aan de meetdraad is een draadje van een bepaald metaal (meestal koper) verbonden, terwijl aan dezelfde lasplaats een tweede draadje van een ander metaal (meestal constantaan) is bevestigd. Men maakt nu gebruik van de eigenschap, dat wanneer de lasplaats van twee verschillende metalen wordt verhit, een e.m.k. ontstaat, die men thermo-e.m.k. noemt.

De thermo-e.m.k., die dus tussen de draadjes c en d ontstaat, kan men meten met een gevoelige draaispoelmeter. De schaal van een dergelijke meter is dan niet lineair, maar kwadratisch. Dit zul je als je het volgende leest, begrijpen.

De meetdraad wordt verhit, waarbij een warmte wordt ontwikkeld, gelijk aan I^2R, waarin R de weerstand van draad a-b is. De temperatuur van de lasplaats is evenredig met de warmte-ontwikkeling. Zorgt men nu, dat R constant is, dan is de temperatuur van de lasplaats evenredig met I^2, dus met het *kwadraat* van de stroom. Men zorgt nu dat R zoveel mogelijk constant blijft door de meetdraad van constantaan te maken, een alliage, dat ervoor zorgt dat de electrische weerstand onafhankelijk blijft van de temperatuur.

Hoe groot de thermo-e.m.k. zal zijn hangt af van de metalen,

10 mA en nemen we aan, dat de weerstand van de gelijkrichtcel in de geleidende richting nul is, dan bedraagt de topwaarde van de gelijkgerichte stroom 10 mA en wijst het instrument ongeveer 3,2 mA aan.

Dezelfde spanning van 10 mA zou echter de meter verder kunnen doen uitslaan, als het mogelijk was dubbelfasige gelijkrichting toe te passen. Uitgaande van een éénfase-stroom is het mogelijk dubbelfasig gelijk te richten, wanneer men maar 4 gelijkrichters gebruikt. De schakeling daarvoor is bekend als schakeling van Grätz (fig. 66). In de figuur is naast elke gelijkrichtcel een pijl getekend, die aangeeft de richting, waarin de stroom kan vloeien. Gedurende de ene helft van de periode van de wisselstroom is de stroomrichting van a naar b over cel 2, de meter en cel 4. De stroom vloeit door de meter dus in de tekening van boven naar beneden. Tijdens de andere halve periode van de wisselstroom vloeit de stroom van b naar a over cel 3, de meter en cel 1. Wéér vloeit de stroom door de meter van boven naar beneden. Het resultaat is dus, dat *elke* halve periode van de te meten wisselstroom een stroom door de meter veroorzaakt. De grafiek van de stroom ziet er dus uit als in fig. 65c. Wéér wijst de meter de gemiddelde waarde van deze dubbelfasig gelijkgerichte wisselstroom aan, doch deze waarde bedraagt thans $2/\pi$ of ongeveer 64% van de topwaarde. Met deze gelijkrichtschakeling zal de meter dus bij een wisselstroom van 10 mA een waarde van 6,4 mA aangeven.

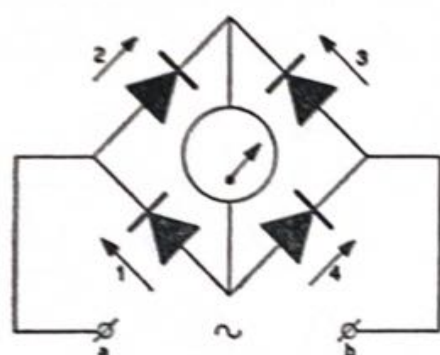


Fig. 66

Voor wisselspanningen is deze schakeling zeer geschikt; het nadeel van de droge gelijkrichter voor het meten van wisselstromen is, dat de cellen alleen werken bij een bepaalde minimum spanning, waardoor het eigen verbruik van de meter betrekkelijk groot wordt.

De droge gelijkrichtcellen zijn alleen te gebruiken voor wisselstromen met frequenties tot ongeveer 12.000 Hz. Bij hogere frequenties gaan de cellen zich als een condensator gedragen, waar-

keling van de spoel veel plaats in, en de luchtspleet zou groter moeten worden. Daardoor zou de veldsterkte van het magnetisch veld weer kleiner worden, hetgeen de gevoeligheid van de meter zou verminderen.

In fig. 69b is nog een meetinstrument getekend, dat verschillende stroommeetbereiken heeft. In de getekende stand zijn de klemmen-paren 1, 2 en 3 niet met elkaar verbonden. De shuntweerstanden R_1, R_2 en R_3 zijn dus niet aan de meter geschakeld. Voor het vergroten van het meetbereik kan men één der klemmenparen 1, 2 of 3 kortsluiten met een kortsluitsteker, waardoor een der shuntweerstanden parallel aan de meter wordt geschakeld. Je kunt zelf gemakkelijk de weerstanden narekenen in het voorbeeld van fig. 69b.

De weekijzermeter.

Een meetinstrument, dat op een heel ander principe berust dan de draaispoelmeter is de weekijzermeter. Er zijn twee uitvoeringen. Een der (oudere) uitvoeringen ziet er uit als in fig. 70. Een spoel trekt een kern van weekijzer aan. Dit geschiedt tegen de kracht van een veer in. Naarmate de stroom groter is, wordt de kern verder in de spoel getrokken. Daarbij is het natuurlijk mogelijk op de kern een wijzer met een schaal vast te maken, zodat de meter verschillende stroomwaarden kan aanwijzen. Een bijzonder voordeel is het daarbij, dat de meter ook voor wisselstroom geschikt is.

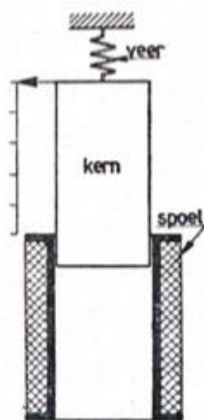


Fig. 70

Zoals we op blz. 115 al hebben aangetoond bezit de draaispoelmeter een lineaire schaal. Dit voordeel mist in principe de weekijzermeter. Men heeft daarom steeds getracht de schaalverdeling zo gelijkmatig mogelijk te maken, door de constructie van de meter te wijzigen. Zo kan men de cilindervormige kern in fig. 70 vervangen door een conusvormige. De inductie stijgt dan bij verder intrekken van de kern in de spoel niet zo snel. Naarmate de kern in de spoel wordt gezogen zal voor gelijke verplaatsing van de kern een grotere hoeveelheid ijzer in de spoel komen. De inductie is evenredig met het aantal krachtlijnen per cm^2, zodat een grotere toeneming van de

zal zijn in te zien, dat de waarde van R_S $^1/_9$ van de weerstand van de meter moet bedragen; de stroom door R_S is immers 9 maal zo groot als die door de meter! In ons voorbeeld zou dus R_S een waarde moeten hebben van $^1/_9$ van 100 ohm = 11,11 ohm.

Bij grotere stroommeetbereiken worden de shuntweerstanden klein. Dat is op zichzelf geen bezwaar, want je kunt ze maken van weerstanddraad, dat in de handel te krijgen is. Dat draad heeft een bepaalde weerstand *per meter,* zodat je de weerstand eenvoudig kan berekenen door de lengte op te meten. Om practisch bruikbare lengten te krijgen moet je goed uitkijken, wat voor soort draad je neemt, dus hoeveel weerstand het draad per meter heeft.

Worden de shuntweerstanden zeer klein, zo in de orde van $\frac{1}{2}$ ohm, dan valt het niet meer mee ze de juiste waarde te geven. De overgangsweerstand van de klemmen, waaraan de weerstanddraad is verbonden gaat een rol spelen, en je kunt niet meer alleen rekening houden met de weerstand van de draad zelf, maar je moet ook zorgen, dat van klem tot klem de weerstand juist gelijk is aan de berekende shuntweerstand.

Daarom is het beter het stroommeetbereik van een meter niet te hoog op te voeren, dan wel een meetinstrument te nemen, dat zelf al een grotere stroom doorlaat bij volle uitslag.

Koop je nu een meter, die een volle uitslag heeft van 1 A, dan zit in het instrument een vaste shuntweerstand, omdat een draaispoelmeter, die 1 A door de draaispoel zelf doorlaat, moeilijk is te bouwen. Het maken van een juiste shuntweerstand is voor de meterfabrikant echter niet zo'n toer, daar hij over betere gereedschappen beschikt dan je zelf hebt.

De stroomsterkte door de spoel van een draaispoelmeter is beperkt uitgevoerd doordat de stroom in de eerste plaats door de veertjes moet worden gevoerd. Dit doet men om te voorkomen, dat losse draadjes zouden moeten worden gebruikt, die het spoeltje in zijn bewegingen zouden kunnen hinderen. De veertjes zijn echter dun, daar hun tegenwerkende krachten klein moeten blijven. Door deze dunne veertjes kan men niet al te grote stromen sturen.

Een andere reden, waarom de stroomsterkte door de spoel van een draaispoelmeter beperkt moet blijven is, dat het draad van de spoel dun moet zijn. Zou men dik draad nemen, dan nam de wik-

schakelweerstand), dan kun je het bereik als spanningsmeter gemakkelijk vergroten. Wil je b.v. 1 volt meetbereik hebben dan zal bij 1 V aan de klemmen een stroom van 1 mA door de meter moeten vloeien. De totale weerstand zal dan moeten bedragen 1000 ohm, zodat R_V een waarde van 900 ohm moet hebben. Natuurlijk kun je op die manier veel hogere meetbereiken maken en het aardige is, dat je daarbij ook de lagere meetbereiken kunt blijven gebruiken. De voorschakelweerstanden schakel je eenvoudig in serie; de waarde van elke weerstand bereken je door te zorgen dat de totale weerstand (met inbegrip van die der tussengeschakelde voorschakelweerstanden voor lagere meetbereiken) de juiste stroom van 1 mA bij volle uitslag oplevert. In fig. 68c is een voorbeeld hiervan gegeven.

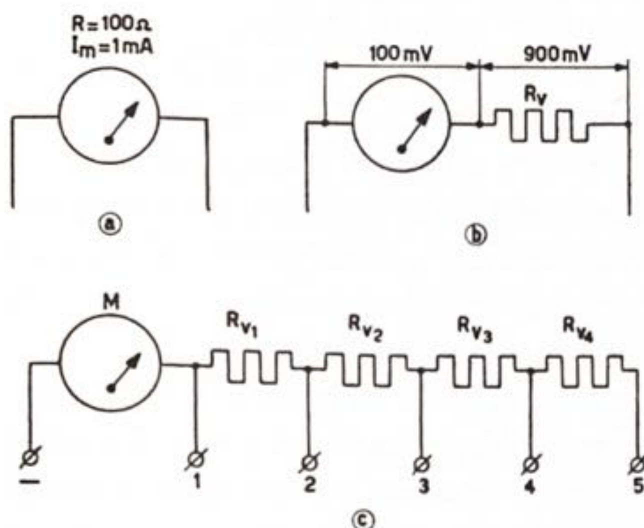


Fig. 68

Bij het vergroten van het stroommeetbereik van de meter moet je deze shunten met een shuntweerstand R_S (fig. 69a). Met dezelfde meter, die een volle uitslag geeft bij 1 mA kun je b.v. een instrument maken, dat een meetbereik heeft van 10 mA, door te zorgen, dat door de meter zelf nog steeds 1 mA vloeit, zodat R_S zo groot moet zijn, dat er 9 mA door vloeit.

Bij parallelschakeling van weerstanden verhouden zich de stroomsterkten als de omgekeerde waarden der weerstanden, zodat het je niet moeilijk

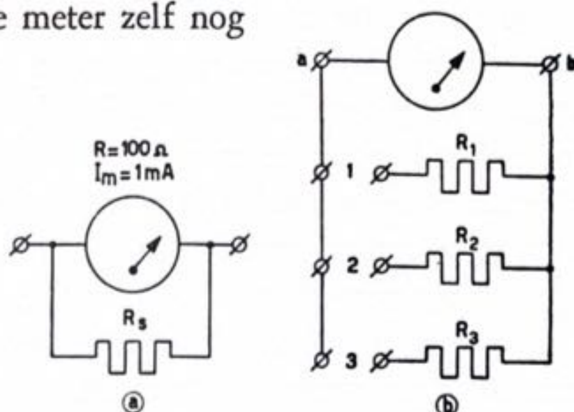


Fig. 69

gebruikt als schakelbordinstrumenten, dus als contrôlemeters in het bedrijf.

Electrodynamische meters.

Electrodynamische meters hebben een vaste en een of meer draaibare spoelen. Beide spoelen (vaste en beweegbare), waardoor stromen gaan, wekken velden op die door hun onderlinge beïnvloeding een draaiing van de beweegbare spoel of spoelen veroorzaken.

Daar de krachten, die de velden op elkaar uitoefenen evenredig zijn met de sterkte der velden, terwijl de veldsterkten weer recht evenredig zijn met de overeenkomstige stromen, zul je inzien, dat de uitwijking van de meter evenredig is met ieder der stromen, dus ook met hun product. Hierbij moet gezorgd worden, dat de tegenwerkende kracht van de veertjes evenredig is met de uitslag, hetgeen niet moeilijk is, daar de constructie hiervan niet veel afwijkt van die der draaispoelmeters.

In fig. 72 is schematisch de werking van de electrodynamische meter voorgesteld. De vaste en de beweegbare spoelen wekken velden op, die zullen trachten met hun krachtlijnen samen te vallen. De beweegbare spoel gaat daardoor draaien totdat de tegenwerkende krachten der veertjes evenwicht vormt met de richtende kracht der velden.

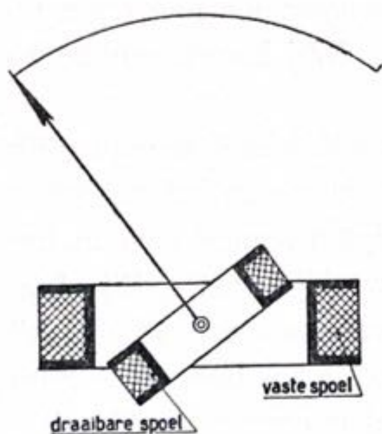


Fig. 72

Je zult nu wel begrijpen, dat in het algemeen de electrodynamische meters gevoelig zijn voor overbelasting, hetgeen zij gemeen hebben met de draaispoelmeters. Bovendien zullen zij geen gebruik kunnen maken van wervelstroomdemping, omdat de velden van de spoelen zouden worden vervormd, hetgeen een verkeerde aanwijzing tot gevolg zou hebben. Deze eigenschap hebben zij dus gemeen met de weekijzermeter.

De vaste spoel van een electrodynamische meter is meestal vrij zwaar uitgevoerd en wordt gebruikt voor het doorlaten van een hoofdstroom. De beweegbare spoel daarentegen moet beslist zo

de magneetpolen groter wordt. De schaal van deze soort weekijzermeters is dus evenmin lineair. Toch kan men de schaal verbeteren, door de plaatjes een bepaalde vorm te geven, evenals dit met de kern van de hierboven beschreven metertypen het geval was. Het ene plaatje blijft dan een rechthoekige vorm houden, terwijl het andere driehoekig wordt gemaakt.

Weekijzermeters zijn goedkoper dan draaispoelmeters. Ze hebben evenwel enige belangrijke nadelen. De schaal is in de eerste plaats niet lineair en moet gecorrigeerd worden, wil men haar min of meer gelijkmatig krijgen. Dan is het stroomverbruik van de weekijzermeter betrekkelijk groot. Terwijl draaispoelmeters van 0,4 tot 4 watt energie verbruiken om uit te slaan hebben weekijzermeters, afhankelijk van de constructie en het meetbereik, 1 tot 10 watt nodig. Een ander nadeel van de weekijzermeters is dat zij gevoelig zijn voor vreemde velden. Doordat het richtende veld tamelijk klein is zal een niet te sterk uitwendig veld voldoende zijn om een storing binnen in de spoel op te leveren, waardoor de kern van de meter een andere stand inneemt dan de bedoeling was. Men kan deze gevoeligheid voor vreemde velden teniet doen door gebruik te maken van astatische meters, waarbij twee systemen met tegengesteld gewikkelde spoelen worden gebruikt. Wij komen nog terug op deze astatische meters.

Behalve voor wisselstroom kan men de weekijzermeter natuurlijk ook gebruiken voor gelijkstroom. Een nadeel is dan het remanent magnetisme van de kern, hetgeen o.a. blijkt wanneer men in het laboratorium metingen verricht met een weekijzermeter. Bij afnemende stroom zullen hogere waarden worden aangewezen dan bij toenemende stroom, hetgeen vanzelf spreekt, als je bedenkt, dat bij afnemende stroom de kern gemagnetiseerd is geweest in één richting en een kleine magneet vormt, die verder tegen de veerkracht wordt ingetrokken, dan wanneer hij niet gemagnetiseerd is.

De nauwkeurigheid van weekijzermeters heeft men belangrijk kunnen opvoeren. De weekijzermeter is zeer stevig van constructie, terwijl men de vaste spoel zo groot kan dimensioneren, dat de meter grote overbelastingen kan verdragen. Weekijzermeters worden, ook al omdat hun nadelen daarbij niet zo'n belangrijke rol spelen veel

ijzerdoorsnede een kleinere van de inductie als gevolg heeft.

Bij de modernere meters is de schuivende beweging van de kern meestal door een draaiende vervangen. In fig. 71 is dit voorgesteld. In een spoel met een langwerpige doorsnede kan een dun plaatje ijzer draaien, dat de kern vormt, waaraan de wijzer van de meter en een dempingsplunjer bevestigd zijn. De vorm van het plaatje is weer zodanig gemaakt, dat in het begin niet zoveel ijzer in het spoeltje komt als later tijdens de draaiing.

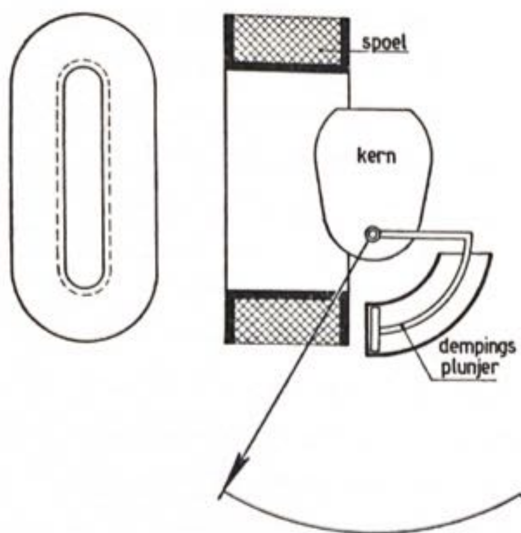
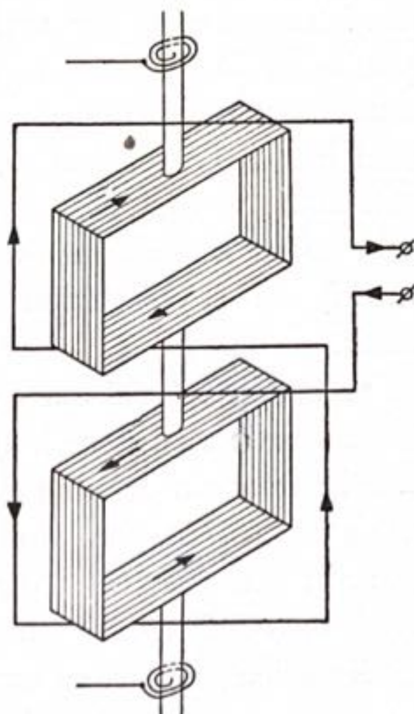


Fig. 71

De demping kan niet door middel van wervelstroom tot stand komen, daar de velden, die daarbij ontstaan het veld van de meterspoel zouden storen. Er is nl. altijd een magneet voor nodig, die krachten op de kern zou uitoefenen, die in verhouding tot de krachten van de spoel ontoelaatbaar groot zijn. Demping heeft dan ook steeds plaats door middel van een plunjer. Deze kan vrij bewegen in een bus, die aan de uiteinden afgesloten is. De beweging wordt geremd doordat de lucht niet snel genoeg tussen de plunjer en de wand van de doos kan stromen.

Bij een andere uitvoering van de draaispoelmeter maakt men gebruik van de afstotende kracht van twee gemagnetiseerde plaatjes of staafjes. Het ene plaatje zit vast, terwijl het andere, dat naast het eerste is geplaatst, kan draaien. Indien nu een stroom door de spoel van de meter wordt gestuurd zullen beide plaatjes worden gemagnetiseerd. Daarbij staan gelijknamige polen tegenover elkaar en het resultaat zal zijn, dat de plaatjes elkaar afstoten. De enig mogelijke beweging is het wegdraaien van het draaibare plaatje, waardoor een asje in beweging komt, waaraan de wijzer van de meter vastzit, terwijl weer een dempingsplunjer op dezelfde as is aangebracht. Naarmate het draaibare plaatje t.o.v. het vaste draait zullen de afstotende krachten kleiner worden, doordat de afstand tussen

terwijl toch hetzelfde principe wordt toegepast. De invloed van de vreemde velden wordt nl. geëlimineerd doordat twee systemen worden gebruikt, waarin de stromen in tegengestelde richtingen vloeien. In fig. 74 is dit getekend. Beide systemen werken op dezelfde as. Er ontstaan nu twee fouten, die gelijk zijn en in tegengestelde richting werken, zodat het resultaat is, dat de fouten elkaar opheffen en geen invloed meer hebben op de stand van de wijzeras. De systemen moeten daarbij nauwkeurig overeenkomen, zowel wat de beweegbare als wat de draaibare spoelen betreft, daar de fouten anders niet gelijk zijn. Dit maakt de astatische meters zeer kostbaar.


Fig. 74

Als wattmeter geschakeld onderscheidt men bij een electrodynamische meter een stroom- en een spanningsspoel. Als stroomspoel, die zwaar moet zijn uitgevoerd maakt men natuurlijk gebruik van de vaste spoel. De draaibare spoel is dan aangesloten op de spanning. In fig. 75 is de schakeling aangegeven. De stroom I' die door de spanningsspoel loopt is evenredig met de spanning.

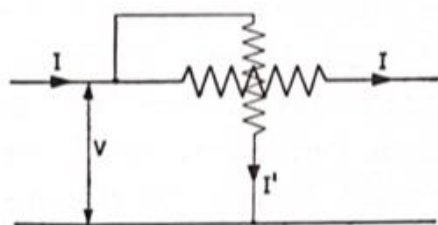


Fig. 75

Is de spanning V en de stroom I, dan zal de meter dus een uitwijking krijgen evenredig met V.I. cos φ, dus met het vermogen dat opgenomen wordt. Wanneer men dan ook vermogen moet meten maakt men meestal gebruik van electrodynamische meters. Het grote nadeel hierbij is, dat deze meters gevoelig zijn voor overbelasting.

Het meetbereik van een electrodynamische wattmeter kan gemakkelijk worden vergroot. Het bereik hangt af van de belastbaarheid van stroom- en spanningsspoel. Het spreekt daarom vanzelf, dat

Electrodynamische meters zijn zowel voor gelijk- als voor wisselstroom geschikt. De nauwkeurigheid is veel groter dan die van de weekijzermeters, vooral als men de meter gebruikt bij zuiver sinusvormige wisselstromen. De metingen worden nl. beïnvloed door de vorm van de wisselstroomkromme.

Men kan de electrodynamische meter met gelijkstroom ijken, waarna hij meteen geijkt is voor wisselstromen.

Een bijzonder voordeel van deze meters is, dat de uitwijking van de draaiende spoel rekening houdt met de faseverschuiving tussen de stromen van draaiende en vaste spoel. Inderdaad kun je aantonen, dat wanneer tussen beide stromen een zekere faseverschuiving bestaat de uitwijking evenredig is met $I_1.I_2 \cos \varphi$. De electrodynamische meter is dus uitstekend te gebruiken als wattmeter!

Een nadeel is weer, dat hij zeer gevoelig is voor vreemde velden. Een constant veld zal natuurlijk geen invloed uitoefenen tijdens een meting met wisselstroom, maar een uitwendig wisselveld zal dat in zo'n geval wel doen. Een dergelijk veld zal gemakkelijk aanwezig zijn, doordat in de buurt van de meter draden lopen, b.v. de toevoerdraden van de meter. Daarom zal men voor nauwkeurige metingen moeten zorgen, dat deze draden evenwijdig van de meter weglopen, zodat hun velden elkaar opheffen. De gevoeligheid van de electrodynamische meter voor vreemde velden is te wijten aan de kleine veldsterkte, waarmede de vaste spoel van de meter werkt. Daardoor zal zelfs het zo zwakke aardmagnetisch veld (constant veld!) invloed kunnen hebben bij metingen met gelijkstroom.

Teneinde de invloed der vreemde velden op de meting te elimineren kan men, nadat men alle voorzorgsmaatregelen heeft genomen twee metingen verrichten, waarbij de stroomrichting in de beweegbare spoel tegengesteld wordt genomen. Van de twee resultaten kan men het gemiddelde nemen.

Het spreekt vanzelf, dat deze gevoeligheid voor vreemde velden wel bezwaarlijk is, vooral in ruimten, waarin tengevolge van de vele apparatuur vreemde velden te verwachten zijn, b.v. in meetkamers voor electriciteitsmeters. Deze moeten geijkt worden met wattmeters, waar men meestal electrodynamische meters voor gebruikt, alsook astatische meters. Deze laatste maken de omkering van de stroomrichting in de beweegbare spoel feitelijk overbodig,

licht mogelijk zijn, wil men de meter gevoelig en nauwkeurig maken (dit was immers ook bij de draaispoelmeter het geval). De stroom, die door de beweegbare spoel vloeit kan daarom in de regel niet de hoofdstroom zijn, maar moet worden afgeleid van een andere grootheid, b.v. de spanning. Zou je b.v. door de vaste spoel de stroom en op de draaibare spoel de spanning aansluiten, dan is de uitslag van de meter een maat voor het product van stroom en spanning, dus voor het vermogen.

Wil je daarentegen de meter gebruiken als stroommeter, dan kun je de stroom niet alléén door de stroomspoel sturen, want zolang er geen stroom door de andere spoel vloeit wijst de meter niets aan. De uitslag is immers evenredig met het product van beide stromen, zodat wanneer een der factoren van dit product nul is, het product zelf ook nul blijft.

Aan de andere kant kun je beide spoelen niet in serie schakelen, want de draaibare spoel is niet zwaar genoeg uitgevoerd om de te meten stroom door te laten.

Daarom wordt de meter in dat geval geschakeld, zoals in fig. 73a is aangegeven. In serie met de spoelen worden weerstanden van manganine opgenomen om te bereiken dat de stroomverdeling in de twee spoelen onafhankelijk blijft van de temperatuur der spoelen. De waarde van R_1 is zeer groot, terwijl die van R_2 zeer klein is, overeenkomende met de weerstanden der spoelen (vaste spoel: weinig windingen van dik draad, dus kleine weerstand; draaibare spoel: veel windingen van dun draad, dus tamelijk hoge weerstand.

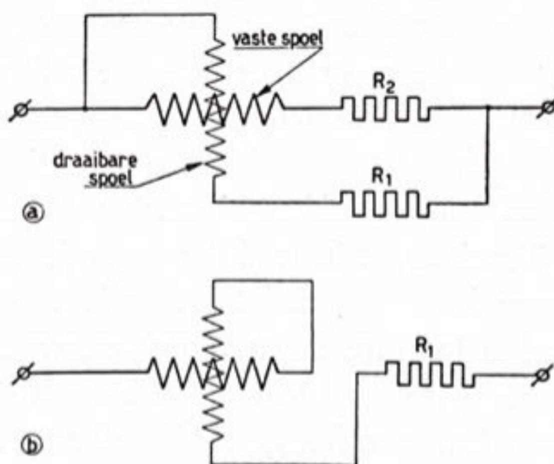


Fig. 73

Bij gebruik als voltmeter worden de spoelen van de meter in serie geschakeld (fig. 73b), terwijl ook nog een weerstand in serie wordt opgenomen, eveneens om temperatuur-invloeden tegen te gaan.

vermenigvuldigen met de constante grootheid, hetgeen gemakkelijk tot stand te brengen is door de keuze van de overbrenging van het telwerk (tandwieloverbrenging). Op dit principe berusten de zgn. ampère-urenmeters, die alleen de stroomsterkte van moment tot moment registreren en het resultaat op een telwerk aangeven. Hierbij moet dan worden uitgegaan van de gedachte, dat de netspanning beslist constant is.

De ampère-urenmeters zijn veelal zgn. motormeters, d.w.z. dat de meter eigenlijk bestaat uit een motor, waarvan de constructie zodanig is, dat het toerental evenredig is aan de stroom, welke door de meter vloeit. De motor zet dan via een tandwiel-overbrenging een telwerk aan het werk. Deze motormeters zijn alleen geschikt voor gelijkstroom. Vaak komt het juist bij gelijkstroom voor, dat de spanning van het net als voldoende constant kan worden beschouwd, om alleen de stroom te meten. Denk b.v. aan een accumulatorenbatterij, waarvan de spanning tijdens ontladen vrij nauwkeurig 2 volt per cel bedraagt (loodaccumulatoren).

Is de spanning niet genoeg constant, dan dient men wel degelijk ook deze grootheid in rekening te brengen. Bij gelijkstroomvoeding kan men er dan mee volstaan de motor te voorzien van een electromagneet voor het opwekken van het veld. Bij ampère-urenmeters past men een permanente magneet toe, waardoor het veld constant is. Wekt men het veld met behulp van een electromagneet op, dan wordt het mogelijk een der grootheden door middel van veldveranderingen te registreren. Daar men nu toch beschikt over een vaste spoel (of twee) en een draaibare spoel (het anker van de motor) kan men de hoofdstroom door de vaste spoel voeren, terwijl men de draaibare ankerspoelen licht kan uitvoeren en deze als spanningsspoelen gebruiken. Hiermede wordt bereikt, dat het aandrijvend koppel evenredig is aan de stroom en de spanning, dus aan het product van deze twee grootheden. Daar bij gelijkstroom geen sprake is van faseverschuiving hebben wij meteen het vermogen. Zorgt men dat het tegenwerkend koppel van de motor evenredig is aan het toerental ervan, dan zal het telwerk na een tijd de verbruikte electrische energie aanwijzen, nl. de spanning maal de stroom maal de tijd ($W = E.I.t$).

Om te bereiken, dat het tegenwerkend koppel evenredig is aan

mogen is nu het vermogen, dat verloren gaat in de spanningsspoel en dat $V_2.I_s$ bedraagt.

Bij beide mogelijke schakelingen wordt dus een te groot vermogen door de meter aangewezen. Men zal daarom rekening moeten houden met de omstandigheden bij het bepalen van de schakeling die men moet toepassen. Is de stroom door de vaste spoel groot, dan zal de extra stroom van de spanningsspoel een verwaarloosbare rol spelen. Daarom zal men de tweede schakeling uit fig. 76b toepassen, wanneer de stroom groot is (en de spanning laag). Bij kleine stromen en betrekkelijk hoge spanningen zal men echter nauwkeuriger meten met de eerste schakeling van fig. 76b.

Bij het meten met wisselstromen moet men dan nog voor het berekenen van de meetfout rekening houden met de faseverschuiving tussen stroom en spanning. Zorgt men, dat de stroomspoel een zeer lage en de spanningsspoel een vrij hoge weerstand heeft, dan zullen inmiddels de meetfouten in beide schakelingen verwaarloosbaar klein kunnen blijven.

Verbruiksmeters.

In de electrotechniek spelen verbruiksmeters natuurlijk een zeer belangrijke rol. Daar men immers electrische energie wil verkopen is het noodzakelijk te beschikken over meters, die het verbruik nauwkeurig aangeven. Het meten van verbruik komt op veel meer plaatsen voor dan het meten van vermogen.

Het verbruik wordt meestal uitgedrukt in kilowatturen. 1 kWh is het verbruik van een vermogen van 1 kW gedurende 1 uur. De verbruiksmeters moeten daarom behalve het vermogen ook de tijd in rekening brengen. Daar bovendien het vermogen en, bij wisselstroommetingen, de faseverschuiving van tijd tot tijd kunnen variëren zal het nodig zijn, dat een verbruiksmeter van moment tot moment de waarden van spanning en stroom registreert. Het registreren geschiedt door middel van een draaiende as, die een telwerk aandrijft, zoals dat in kilometer-tellers e.d. wordt toegepast.

Uit het bovenstaande volgt direct, dat wanneer een van de grootheden constant is (meestal de spanning), volstaan kan worden met een meter, die alleen de andere (variërende) grootheden registreert. Om het uiteindelijke antwoord te krijgen hoeft men dan alleen te

men het meetbereik kan verhogen door in serie met de spanningsspoel een voorschakelweerstand en parallel met de stroomspoel een shuntweerstand op te nemen. Doordat het shunten van de stroomspoel bij wisselstroommetingen fouten kan opleveren, doordat de verhouding van impedantie tussen shuntweerstand en stroomspoel niet constant is maakt men vaak gebruik van stroomtransformatoren, waarbij de stroomsterkte dus door transformatie verminderd wordt.

Een handig middel om verscheidene stroommeetbereiken zonder transformatie ter beschikking te hebben is de mogelijkheid om de twee helften van de vaste stroomspoel in serie of parallel te schakelen. De stroomspoel wordt nl. meestal in twee gelijke helften gemaakt teneinde een symmetrische opstelling t.o.v. de as van de wijzer te verkrijgen. Bij sommige wattmeters is de stroomspoel zelfs in vier delen gesplitst en kan men dus door serie-parallelschakelingen nog meer stroombereiken maken.

Er zijn twee manieren om een wattmeter te schakelen. In fig. 76 zijn deze voorgesteld. Je kunt nl. de spanningsspoel vóór of na de stroomspoel aansluiten. In fig. 76a meet je $V_1.I$, dat is het vermogen, dat vóór de meter wordt opgenomen. In de stroomspoel van de meter gaat evenwel ook vermogen verloren, doordat deze spoel weerstand heeft. Het werkelijk geleverde is dus kleiner dan het gemeten vermogen. Als R de weerstand is van de stroomspoel, dan wordt dus een vermogen I^2R te veel gemeten.

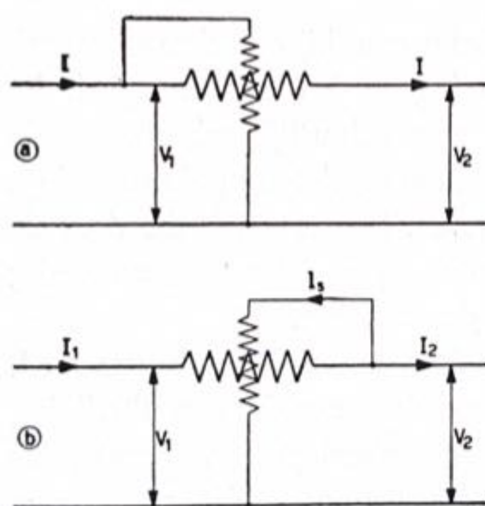


Fig. 76

In fig. 76b is de spanningsspoel na de stroomspoel geschakeld. Je zou dus zeggen, dat het afgegeven vermogen na de meter wèl wordt gemeten. Het gemeten vermogen is evenwel wéér te hoog, doordat door de stroomspoel een grotere stroom vloeit dan in werkelijkheid wordt afgegeven, nl. de stroom van de spanningsspoel I_s. Het te veel gemeten ver-

maar overigens even groot zijn. Aangenomen is nog, dat de stroom I_2 in de spanningsspoel een bepaalde hoek ψ naijlt bij de stroom I_1 in spoel 1. De wervelstromen Iw_1, Iw_2 en Iw_3 ijlen 90° na bij de velden, die deze stromen opwekken, dus respectievelijk Φ_1, Φ_2 en Φ_3.

Men heeft nu weliswaar een koppel, maar het is de vraag of dit drijvend koppel evenredig is aan het vermogen. Dit zal inderdaad het geval zijn, wanneer het totale koppel evenredig is aan E.I.cos φ. Men kan nu aantonen, dat dit het geval zal zijn wanneer de stroom I_2 90° naijlt bij de spanning E.

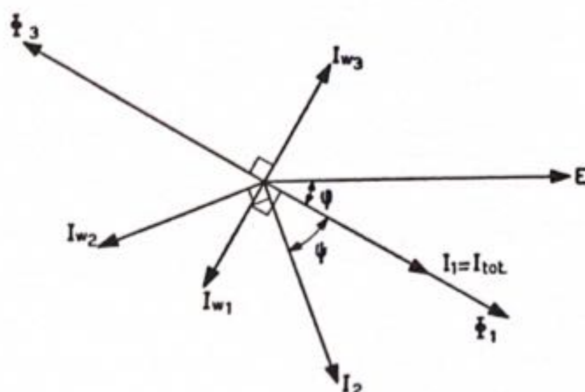


Fig. 79

Om deze faseverschuiving tussen de stromen in de spannings- en stroomspoelen te verkrijgen zorgt men in de eerste plaats voor een grote zelfinductie in de spanningsspoel, hetgeen weer door middel van veel windingen kan worden bereikt. Verder is de inductie van belang. Deze is natuurlijk groter door de aanwezigheid van een ijzeren kern, maar wordt verkleind, doordat de luchtspleet tamelijk groot is. De spleet moet inmiddels groot genoeg zijn om de schijf vrij te laten draaien.

Om de invloed van de spleet tegen te gaan past men magnetische kortsluiting toe. De spanningsspoel wordt op een M-vormige kern gemonteerd (fig. 80b). De benen van de kern komen tegenover de schijf te staan. Direct achter de spanningsspoel plaatst men kleine stukjes ijzer, die het magnetisch veld in hoofdzaak sluiten, waardoor de zelfinductie van de spanningsspoel veel groter wordt. Het resterende veld voor het opwekken van wervelstromen is dan wel veel kleiner ter plaatse van de schijf, maar toch voldoende voor het opwekken van het aandrijvend koppel.

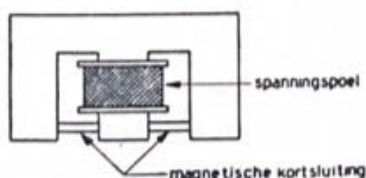


Fig. 80b

deel van de kern B ontstaat een veld, dat evenredig is met de spanning en dat 90° t.a.v. de velden van de stroomspoelen is verschoven. De velden zullen nu in de schijf wervelstromen opwekken, waardoor op de schijf een kracht gaat werken, welke de schijf aan het draaien brengt. In fig. 78 is dit nader aangegeven. Je ziet daar de drie spoelen op de benen A, B en C van de kern. Door de spoelen lopen de stromen I_1, I_2 en I_3, waarbij dus I_1 en I_3 de hoofdstroom voorstellen en tegengesteld gerichte velden opleveren. I_2 is de stroom door de spanningsspoel, waarvoor gezorgd is, dat deze 90° in fase is verschoven t.o.v. de stromen in de stroomspoelen.

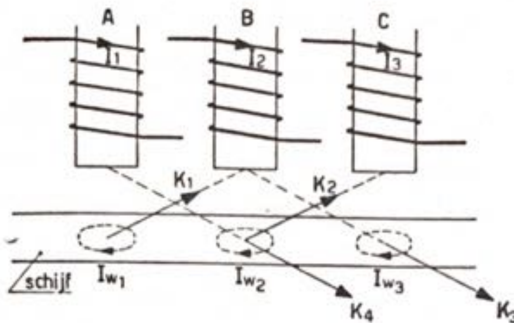


Fig. 78

De drie velden wekken nu in de schijf wervelstromen op, die zijn aangegeven met Iw_1, Iw_2 en Iw_3. Door onderlinge krachtwerking tussen de wervelstroomvelden en de velden van in de nabijheid geplaatste andere benen van de kern ontstaan krachten, die de schijf aan het draaien kunnen brengen. Zo zal het veld van Iw_1 met dat van I_2 de kracht K_1 opleveren. Op dergelijke wijzen ontstaan de krachten K_2, K_3 en K_4. Deze krachten zijn alle in de tekening naar rechts gericht, zodat de schijf naar rechts gaat draaien. In werkelijkheid zijn de benen van de kern dichter bij de schijf geplaatst dan naar verhouding in de tekening is aangegeven. Hierdoor zullen de krachten kleinere hoeken met het oppervlak van de schijf maken, waardoor een groter deel ervan aan de draaiing van de schijf meewerkt. Het is dus voor een sterk draaiend koppel van belang, dat de kernen van de stroom- en spanningsspoelen zo dicht mogelijk bij de schijf komen.

In fig. 79 is nog het vectordiagram van de stromen en de spanning in de spoelen van de meter weergegeven. Uitgaande van de spanning E, die horizontaal naar rechts getekend is nemen we aan, dat de hoofdstroom $I_1 = I_{totaal}$ een hoek φ naijlt bij de spanning. Het veld Φ_1 is in fase met de stroom I_1. Doordat de wikkeling op kernbeen C tegengesteld gewikkeld is zal veld Φ_3 180° naijlen bij Φ_1,

het toerental van de motor maakt men gebruik van een aluminium schijf, die op de as van de motor is gemonteerd en die tussen de polen van een permanente magneet kan draaien. De schijf wordt dus afgeremd, doordat daarin wervelstromen worden opgewekt door het veld van de magneet (dat ter plaatse zeer sterk kan zijn). Deze wervelstromen wekken wéér velden op, die echter zodanig gericht zijn, dat zij zich verzetten tegen hun oorzaak (wet van Lenz). Zouden zij zich daartegen niet verzetten, maar juist meewerken, dan zou de schijf verder zonder enige aandrijving altijd kunnen blijven draaien en dit perpetuum mobile is natuurlijk niet mogelijk. Je kunt nu aantonen, dat de tegenwerkende kracht van de wervelstromen evenredig is aan het toerental van de schijf, dus ook van de motor van de meter. De motormeters voor gelijkstroom worden zeer weinig gebruikt, daar meestal de spanning voldoende constant is en men dus met de eenvoudige ampère-urenmeters kan volstaan. Voor wisselstroom kan men de motormeters ook wel gebruiken, maar hiervoor zijn ze geheel verdrongen door de nog te bespreken inductie-meters.

Inductie-verbruiksmeters voor één fase.

Wanneer in één fase het verbruik moet worden gemeten, doet men dat met behulp van inductiemeters met ferrarisschijf. Deze schijf, meestal van aluminium gemaakt, is gemonteerd op een as, die het telwerk van de meter kan aandrijven. Het aandrijven van de ferrarisschijf geschiedt door middel van velden welke door vast opgestelde stroom- en spanningsspoelen opgewekt worden.

In fig. 77 is de opstelling van de schijf t.o.v. de aandrijvende velden schematisch voorgesteld. Op een kern, die gelamelleerd is zijn drie spoelen gemonteerd. De spoelen op de benen A en C van de kern zijn stroomspoelen, terwijl de spoel op het middelste been B een spanningsspoel is. De stroomspoelen zijn in serie geschakeld, maar tegengesteld gewikkeld, zodat op elk ogenblik de velden t.o.v. de schijf tegengesteld gericht zijn. De grootte van de velden is echter wel constant (Φ_1). In het middelste

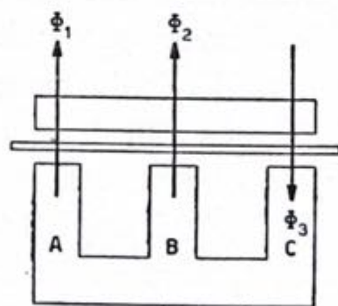


Fig. 77

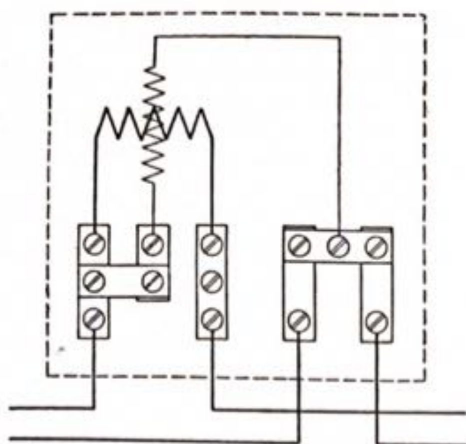


Fig. 83

de rechter aansluitklem te verbinden. Je zult nu ook wel begrijpen, waarom ook deze aansluitklemmen nauwkeurig worden verzegeld: als ze dat niet deden, zou men heel eenvoudig het klemmetje van de spanningsspoel kunnen losmaken en de meter draaide niet verder. Ook spreekt het vanzelf, dat bij ompolen van de stroomspoel de meter achteruitdraait!

Cos φ-meters.

Voor het meten van cos φ bestaan meters, die de waarde van de arbeidsfactor, zoals cos φ ook vaak wordt genoemd, dadelijk aanwijzen. Je zou natuurlijk ook een electrodynamische wattmeter kunnen gebruiken voor het meten van W, met een paar andere meters E en I kunnen meten en tenslotte uit $\frac{W}{E \cdot I}$ de waarde cos φ bepalen. De belangrijkheid van de arbeidsfactor heeft echter direct afleesbare cos φ-meters in het leven geroepen. In fig. 84 zie je het principe weergegeven. De meter berust op het beginsel van de electrodynamische meter, waarbij de uitslag van de wijzer dus wordt bepaald door de invloed, die twee velden op elkaar uitoefenen.

Zoals je in de figuur kunt zien is er een vaste spoel, waar de hoofdstroom I door gaat. Deze spoel is, evenals bij de electrostatische meter, meestal in twee delen gesplitst om een symmetrische constructie van de meter mogelijk te maken.

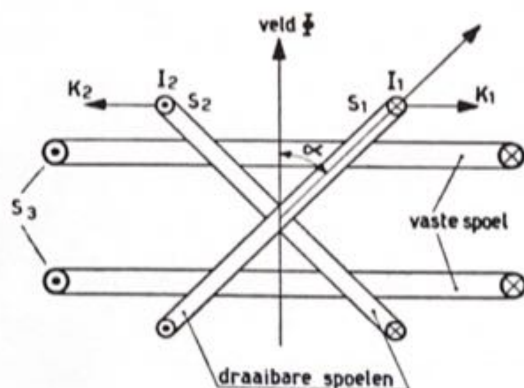


Fig. 84

Voor het principe van de meter speelt dit echter geen rol en kun je de twee helften als één vaste spoel beschouwen.

Het draaibare gedeelte van de meter heeft niet één, maar twee

We hebben nu uitvoerig gezien hoe het aandrijvend koppel bij inductiemeters ontstaat. Rest nog te zeggen, dat het tegenwerkend koppel evenredig moet zijn aan de snelheid van de schijf. Dit wordt weer bereikt door de schijf tussen de polen van een permanente magneet te laten draaien. De magneet is bovendien verstelbaar zodat de polen meer of minder dicht bij de as van de schijf kunnen worden geplaatst. Zijn de polen ver van de as verwijderd, dan zal de schijf bij een bepaald toerental onder de polen van de magneet een grote snelheid hebben en dus krachtiger worden afgeremd dan wanneer de polen dicht bij de as liggen. Dat de magneet niet gemist kan worden bemerkte iemand, die wilde knoeien met zijn meter. Niet geheel ter zake kundig wilde hij de magneet sterker maken, opdat het remmend koppel groter zou worden. Zoveel wist hij er dus wel van. Hij ging daarbij inmiddels zo raar te werk, dat het gevolg was dat de meter veel en veel harder ging draaien! Hij wilde het versterken van de magneet nl. van buitenaf bewerkstelligen, zodat hij de zegels van de meter niet hoefde te verbreken. Inderdaad gelukte het hem blijkbaar de magneet in een sterk veld te brengen, maar natuurlijk werd de magneet niet krachtiger (dat kon hij van buiten de meterkap af ook niet bereiken) maar verloor juist zijn magnetisme, althans zover het de schijf betrof. In fig. 82 zie je de vorm van de meest gebruikte magneten. Zoals je ziet draait de schijf in het (krachtige) veld van de permanente magneet M. Na de manipulaties van bovengenoemd heerschap was de magneet zodanig veranderd, dat beide uiteinden Noordpolen waren, terwijl bij de ronding juist een Zuidpool ontstond. De magneet was wel bekrachtigd, maar de schijf draaide niet langer in een sterk veld, zodat hij bij het minste verbruik met een behoorlijk gangetje ging rondtoeren! Het enig remmend koppel was toen nog de wrijving van de lagers, en die is zéér gering bij de moderne meters.

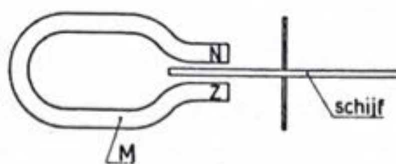


Fig. 82

De normale aansluiting van een meter voor één fase zie je in fig. 83. Zoals je ziet bestaat de mogelijkheid de spanningsspoel ook nà de stroomspoel aan te sluiten door het verbindingspennetje met

Wanneer je in een electriciteitsmeter kijkt zie je nog een bijzonderheid. Rond de spanningskern kun je een dikke winding koperdraad zien. De uiteinden van de winding lopen een eind evenwijdig van de kern af, terwijl op deze twee evenwijdige uiteinden een ruiter is geplaatst, die op een bepaalde plaats is vastgeschroefd (fig. 80a). Met behulp van deze constructie heeft men een middel om de meter nauwkeurig te ijken, terwijl men tevens de faseverschuiving tussen de velden van spanningsspoel en stroomspoel toch nog precies 90° kan maken. Hoe dit mogelijk is toont het vectordiagram van fig. 81. De spanning E wekt een veld Φ_2 op, dat eigenlijk 90° zou moeten naijlen bij E, maar dit niet doet, omdat de spanningsspoel geen zuivere zelfinductie is maar ook ohmse weerstand heeft. In de kortgesloten winding om de spanningskern wordt nu door het veld Φ_2 een e.m.k. opgewekt, die 90° naijlt bij het opwekkend veld Φ_2. Deze e.m.k. is in het diagram aangegeven door E_k. Deze e.m.k. veroorzaakt in de kortgesloten winding een stroom I_k, die sterk in fase naijlt bij de e.m.k. doordat de kortgesloten winding geheel om ijzer ligt. De stroom I_k levert dus een veld Φ_k op. Dit veld Φ_k werkt in de spanningskern samen met het oorspronkelijke veld Φ_2. Men kan nu Φ_k zo instellen dat het met Φ_2 een resulterend veld Φ_R oplevert, dat wèl precies 90° naijlt bij de oorspronkelijke spanning E.

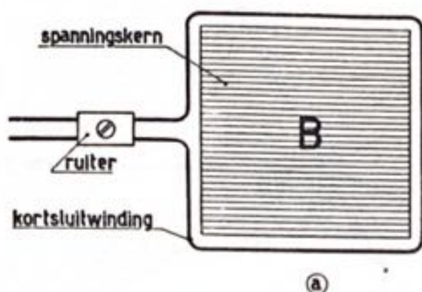


Fig. 80a

Zelf kun je met behulp van een tekening nagaan, dat je de richting van Φ_R kunt variëren, door de *grootte* van Φ_k te veranderen. Φ_k zal afhangen van de grootte van de stroom I_k in de kortgesloten winding. Deze wordt ingesteld door de weerstand van de winding te variëren hetgeen geschiedt door de ruiter meer of minder dicht bij de winding vast te schroeven.

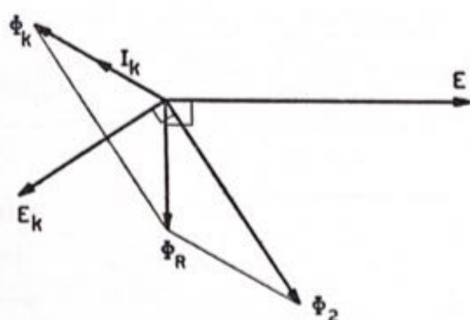


Fig. 81

als voor stromen die naijlen geschikt is; de wijzer moet daarbij over 180° kunnen draaien. De meter heeft geen tegenwerkend koppel van veertjes, zodat hij wanneer hij niet is aangesloten elke stand kan innemen. Cos φ-meters worden ook wel uitgevoerd met een systeem van spoelen met een wijzer, die 360° kan draaien. De meter geeft dan niet alleen vóór- en naijlende stroom aan, maar ook de richting waarin het vermogen wordt geleverd. Er zijn dan vier kwadranten, twee voor één richting van het vermogen en twee voor de andere. Deze meters worden gebruikt in koppelleidingen tussen twee centrales, waarbij afwisselend de ene centrale bijspringt met energielevering aan de andere en omgekeerd.

Soms wordt een faseverschuivingsmeter ook uitgevoerd met twee vaste spanningsspoelen, die weer loodrecht op elkaar staan en met een draaibare stroomspoel. De werking is natuurlijk dezelfde, daar de koppels weer op dezelfde manier kunnen worden afgeleid. Alleen werken nu op één spoel (de draaibare stroomspoel) twee koppels, die samen één resulterend koppel opleveren.

De faseverschuiving van de stroom I_2 t.o.v. de spanning E wordt verkregen door spoel S_2 in serie met een smoorspoel op het net aan te sluiten. Men zou natuurlijk ook een capaciteit kunnen nemen. Door deze wijze van faseverschuiving is de meter natuurlijk wel frequentie-afhankelijk, hetgeen in de practijk niet ernstig is, daar de frequentie van het net (50 Hz) voldoende constant wordt gehouden.

Frequentiemeters.

Een belangrijke grootheid is de frequentie van het net. Er zijn twee soorten frequentiemeters. De eerste soort werkt met resonerende tongen, die alle een verschillende lengte hebben en zodanig zijn gemaakt, dat hun mechanische resonantie gelijk is aan een aantal frequenties in de buurt van de netfrequentie. Zo kun je op een rijtje tongen vinden, die in trilling raken bij frequenties van:

$47 - 47\frac{1}{2} - 48 - 48\frac{1}{2} - 49 - 49\frac{1}{2} - 50 - 50\frac{1}{2} - 51 - 51\frac{1}{2} - 52 - 52\frac{1}{2} - 53$

Deze rij tongen staat voor een electromagneet, die eenvoudig aan het net wordt aangesloten. Wanneer nu het net op zeker ogenblik een bepaalde frequentie heeft, die iets kan afwijken van de gewenste frequentie van 50 Hz — de frequentie kan b.v. bedragen

de spoel en in de regel zal het koppel niet maximaal zijn. Als je wel eens machanica hebt gehad zul je ongetwijfeld weten dat het koppel in dit geval bepaald wordt door K maal de arm maal de sinus van de hoek die K met de richting van de arm maakt. Deze hoek is α en is in de tekening aangegeven. Het is tevens de hoek waarover zowel de spanningsspoelen als de wijzer zijn gedraaid. Daar de arm in ons geval constant is kunnen we dus zeggen, dat $K_1 \sin \alpha$ het eens mechanica hebt gehad zul je ongetwijfeld weten dat het koppel van spoel S_2 gelijk is aan $K_2 \sin (90^\circ - \alpha) = K_2 \cos \alpha$. Denk erom dat deze 90° niets te maken hebben met de faseverschuiving tussen de stromen I_1 en I_2 maar alleen hier voorkomen, omdat de spoelen 90° t.o.v. elkaar geplaatst zijn! Voor de koppels kunnen we dus schrijven: $M_1 = K_1 \sin \alpha$ en daar $K_1 :: E.I. \cos \varphi$ is dus $M_1 ::$ $E.I. \cos \varphi \sin \alpha$. Op dezelfde manier kun je gemakkelijk uit het voorgaande afleiden, dat het tweede koppel $M_2 :: E.I. \sin \varphi \cos \alpha$.

Wanneer nu de meter wordt aangesloten zal de wijzer een bepaalde stand innemen. In deze stand is er evenwicht tussen beide koppels. Voor deze evenwichtsstand kunnen we dus beide gevonden koppels aan elkaar gelijk stellen, zodat we kunnen schrijven:

$$C_1.E.I. \cos \varphi . \sin \alpha = C_2.E.I. \cos \alpha . \sin \varphi$$

waarin C_1 en C_2 constanten zijn, die we hier wel moeten plaatsen, omdat we geen uitdrukking voor M_1 en M_2 hadden gevonden maar alleen een evenredigheid.

Met goniometrie kun je gemakkelijk aantonen dat hieruit volgt:

$$C_1.E.I. \operatorname{tg} \alpha = C_2.E.I. \operatorname{tg} \varphi$$

of na vereenvoudiging en deling door E en I:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{C_2}{C_1} \operatorname{tg} \varphi = C_3 \operatorname{tg} \varphi$$

waarin C_3 een nieuwe constante is, die C_2/C_1 vervangt. Blijkbaar is dus de hoek α waarover de meter draait een maat voor de faseverschuiving. Je zou hierbij kunnen opmerken, dat de schaal dus wel lineair is, maar dat zou alleen maar het geval zijn wanneer je de hoek φ zou willen aflezen. Daar je echter de cosinus ervan wilt hebben wordt de schaal niet lineair.

We merken nog op, dat de meter zowel voor stromen, die vóór-

spoelen, die nauwkeurig 90° t.o.v. elkaar zijn gemonteerd. Dit zijn de spanningsspoelen. Door de ene spoel gaat een stroom, die in fase is met de aangelegde spanning, door de andere spoel gaat een stroom, die opzettelijk 90° in fase met de aangelegde spanning is verschoven. De richting van de stromen wordt natuurlijk bepaald door de wikkelrichting van de spoelen. Uit de tekening kun je deze richtingen nagaan als je bedenkt, dat een kruisje betekent, dat een stroom van je af gaat, terwijl een puntje in de spoelzijde betekent dat daar de stroom naar je toe komt.

Door samenwerking van het veld van de stroomspoel (vaste spoel) en de beide velden van de spanningsspoelen zullen twee krachten K_1 en K_2 ontstaan, die dus twee koppels opleveren. Deze koppels brengen samen de draaibare spanningsspoelen in de juiste stand, die je dan met behulp van een wijzer kunt aflezen. De enige eis is daarbij, dat de stand, waarin de spoelen komen een maat voor de faseverschuiving moet zijn.

Noemen wij de spanningsspoelen S_1 en S_2, waar respectievelijk de stromen I_1 en I_2 door gaan, dan ontstaan op deze spoelen de krachten K_1 en K_2. Hierbij nemen we b.v. aan dat I_1 in fase is met de spanning E en natuurlijk evenredig is aan E. Er ontstaat dan (net als bij de electrodynamische meter) een kracht op S_1, die evenredig is aan het product van de veroorzakende stromen maal de cos van de faseverschuivingshoek tussen de stromen. De stromen, die K_1 veroorzaken zijn : de hoofdstroom I en de stroom I_1 door spoel S_1. Daar de stroom I_1 in fase is met de spanning E betekent dit dus dat K_1 evenredig is aan E.I. cos φ.

De stroom I_2 is opzettelijk 90° in fase met E verschoven. Overigens is natuurlijk ook kracht K_2 evenredig aan het product van de hoofdstroom en I_2 maal de cos van de faseverschuivingshoek tussen deze twee stromen, zodat K_2 evenredig is aan E.I. cos $(90°\text{-}\varphi)$. Wie een weinig goniometrie kent zal inzien, dat dit dus wordt : K_2 : : E.I. sin φ (: : betekent „evenredig aan").

Beide krachten K_1 en K_2 veroorzaken een koppel. Dat koppel is niet altijd even groot, want K_1 en K_2 werken in een bepaalde richting onafhankelijk van de stand van de respectievelijke spoelen; je begrijpt, dat het koppel het grootst is wanneer de kracht loodrecht op het vlak van de spoel werkt, maar dat is maar in een stand van

R_4 gelijk aan die door R_2. Deze stromen zijn aangegeven met resp. I_1 en I_2. Als nu $I_1R_1 = I_2R_4$ zodat dus de spanningsvallen in R_1 en R_4 gelijk zijn, dan zal tussen P en Q geen spanning staan. Natuurlijk zullen de spanningsvallen in R_3 en R_2 dan ook gelijk zijn, zodat je ook kunt schrijven $I_1R_3 = I_2R_2$.

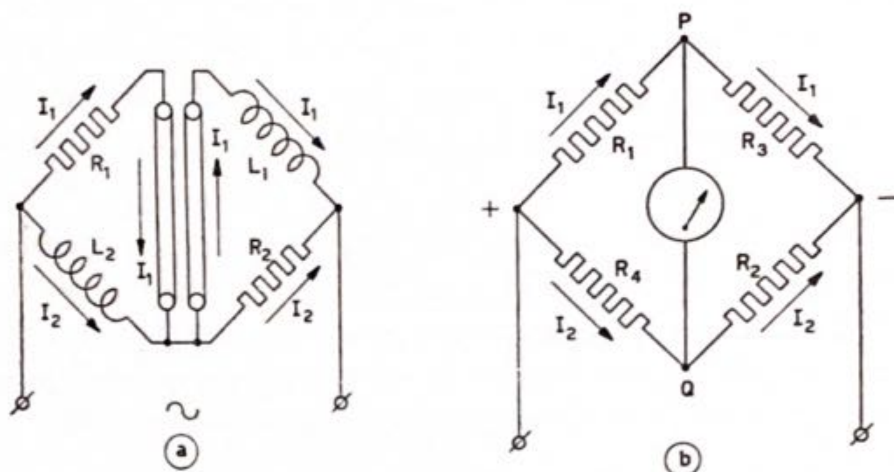


Fig. 87

Uit de eerste vergelijking kun je afleiden:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_4}{R_1}$$

en uit de tweede:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_3}$$

zodat uit beide vergelijkingen volgt:

$$\frac{R_4}{R_1} = \frac{R_2}{R_3} \text{ of } R_1R_2 = R_3R_4$$

Zoals je ziet is het dus mogelijk de waarden der weerstanden zo te kiezen, dat, hoewel aan de klemmen van de brugschakeling een spanning wordt gelegd, zodat door de takken van de brug stromen vloeien, tussen P en Q geen spanning staat. De producten der overstaande weerstanden moeten daartoe gelijk zijn. Men zegt dat de brugschakeling „in evenwicht" is.

Zo'n brugschakeling is nu ook in fig. 87a opgebouwd. Daar aan de bovenzijde geen verbinding is moet de stroom I_1 door beide

lijkt een vrij onnauwkeurig instrument, maar met enige moeite kun je de frequentie zeer scherp bepalen. Het is b.v. met de bovengenoemde reeks tongen geen kunst een frequentie $49\frac{3}{4}$ af te lezen. In dat geval moeten de tongen $49\frac{1}{2}$ en 50 een precies even grote uitwijking hebben. Werk je ook nog met de uitwijkingen van de verder in de buurt gelegen tongen, dan kun je nog preciezer werken. Fig. 85 toont dit voor 50 - 50,1 - 50,2 en 50,25 Hz! Deze meter heeft meer tongen dan de bovengenoemde reeks, maar de onderverdeling is dezelfde: elke tong heeft een eigen frequentie, die telkens $\frac{1}{2}$ Hz hoger ligt dan de voorgaande.

De tongenfrequentiemeters, die stevig in elkaar zitten, zijn bij uitstek geschikt voor gebruik in een bedrijf. Zij zijn alleen gevoelig voor mechanische schokken — waar je ook bij draagbare uitvoeringen rekening mee moet houden — en dus bij vaste montage voor die plaatsen waar machines trillingen veroorzaken.

Het principe van de wijzerfrequentiemeter zullen wij aan de hand van fig. 86 kort bespreken. Het draaibare gedeelte van de meter, waar dus ook de wijzer aan is bevestigd, wordt in stand gebracht door middel van twee loodrecht op elkaar gemonteerde spoelen S_1 en S_2. Deze spoelen zijn opgenomen in een brugschakeling, welke in fig. 87a nog iets anders is getekend, daar hierin de onderlinge stand van de spoelen niet is verwerkt. In fig. 87b is het principe van de brugschakeling met behulp van uitsluitend weerstanden weergegeven. Deze brug van Wheatstone heeft 4 knooppunten. Aan twee tegenover elkaar gelegen punten wordt een spanning aangelegd, terwijl aan de andere twee punten een meter wordt aangesloten. Het is nu mogelijk te zorgen dat door de meter geen stroom vloeit, m.a.w. dat tussen P en Q geen spanning staat. Zodoende zal de stroom door R_1 gelijk zijn aan die door R_3 en de stroom door

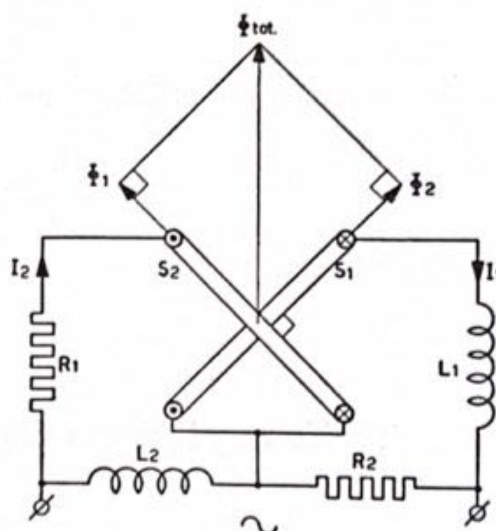


Fig. 86

49½ Hz — zien we het tongetje met die resonantiefrequentie heftig heen en weer gaan. Dit gaat in werkelijkheid zo vlug, dat we een bandje zien. De tongen zijn nl. aan de uiteinden omgebogen, terwijl de meter zo is gebouwd, dat je tegen de bovenkant van de tongen aankijkt, waardoor je dus alleen de omgebogen einden in de vorm

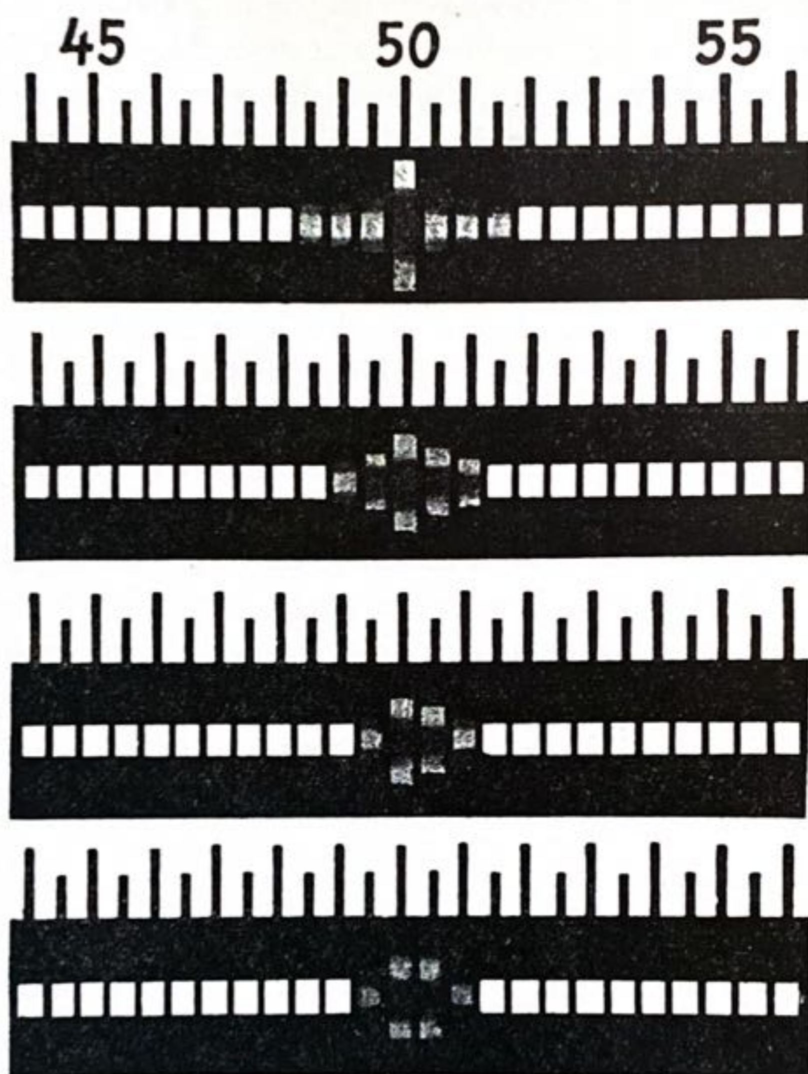


Fig. 85

van kleine vierkantjes ziet. De bewegende tong echter zie je in de vorm van een bandje, daar het uiteinde heftig heen en weer trilt, 49½ maal per seconde.

De daarnaast gelegen tongen 49 en 50 trillen ook, maar hebben een veel kleinere amplitude. De volgende tongen zijn echter in rust, kleine uitwijkingen daargelaten. Zo'n tongenfrequentiemeter

kende standaardweerstand is. De weerstanden R_4 en R_2 zijn dan niet als vaste weerstanden maar als één variabele weerstand met het punt Q als „glijcontact" uitgevoerd. Met behulp van de meter, die tussen P en Q is geschakeld kun je nu net zo lang de variabele weerstand veranderen totdat de brugschakeling in evenwicht is. Zo kun je dan de onbekende weerstand bepalen, want je weet de waarde van R_1 en de verhouding van $R_2 : R_4$ of omgekeerd.

Daar wij al eens hebben afgeleid, dat bij evenwicht $R_1R_2 = R_3R_4$ in de figuur zul je begrijpen, dat:

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_4}{R_2}$$

Deze verhouding R_4/R_2 nu is direct af te lezen op de variabele weerstand, zodat je R_1/R_3 weet en dus ook de onbekende weerstand R_3 als je de standaardweerstand R_1 kent.

Het meten van zelfinducties en capaciteiten wordt eveneens mogelijk met een brugschakeling, wanneer je maar gebruik maakt van wisselstroom voor de voeding van de brug. Als aanwijsinstrument moet je geen galvanometer (gevoelige draaispoelmeter) nemen, zoals bij de brug van Wheatstone, omdat een draaispoelmeter geen wisselstroom aanwijst. Kies dus een aanwijsinstrument, dat gevoelig is en wisselstromen kan aantonen, b.v. een hoofdtelefoon of een themokoppelmeter. Daar de laatste wel wisselstromen aanwijst, maar weer niet erg gevoelig is maakt men vaak gebruik van buisvoltmeters, die zeer gevoelig te maken zijn en met versterkerbuizen werken.

De evenwichtsvoorwaarden voor een dergelijke wisselstroombrugschakeling zijn af te leiden op dezelfde manier als voor de gelijkstroombrug van Wheatstone, als je maar de complexe rekenwijze toepast, een rekenmethode, die het mogelijk maakt met wisselstroomgrootheden net als met gelijkstroom te rekenen, daar in de rekenwijze de faseverschuivingen zijn verwerkt. Deze rekenmethode is natuurlijk wel iets ingewikkelder dan het normale rekenen met reële getallen, maar als je haar eenmaal onder de knie hebt, zul je het voordeel ervan inzien.

Het meten van vermogen en verbruik in draaistroomnetten.

In principe kun je vermogen in een draaistroomnet eenvoudig meten door de meting voor éénfasenetten driemaal te verrichten. Niet

In de eerste plaats zijn er de draaiveldaanwijzers. Zoals je weet draait het veld van een driefasennet. Het is van belang voor het aansluiten van motoren b.v. te weten in welke richting het draait. Als de aders gemerkt zijn is de draairichting van het veld gemakkelijk te bepalen, maar heb je de drie aders ongemerkt, dan wil je de volgorde wel eens weten vóór je tot aansluiting van de motor overgaat. Daartoe zijn handige instrumentjes in de handel, die draaiveldaanwijzers worden genoemd. Een type daarvan bestaat uit drie magneten, die op de drie fasen worden aangesloten. Tegenover de magneten is een metalen schijf geplaatst, die in de richting van het veld zal gaan draaien. De klemmen van de meter zijn gemerkt R, S en T, de gebruikelijke benaming voor de drie fasedraden van een draaistroomnet. Sluit men de draden in de juiste volgorde R-S-T aan, dan draait de schijf in de goede richting, d.w.z. in de richting van de pijl, die erop is getekend. De volgorde van de draden kan dan natuurlijk ook S-T-R zijn, wat geen verschil maakt.

Bij een ander type draaiveldaanwijzers maakt men gebruik van schakelingen van weerstanden en condensatoren. Zijn deze in een bepaalde volgorde op de drie fasen van het net aangesloten dan zal tussen twee punten van de schakeling een spanning optreden en tussen twee andere punten niet. Er zijn nu twee lampjes in de meter aangebracht, die de richting van het veld aangeven. Een der twee lampjes gloeit nl. en bij deze staat een pijl, die de richting R-S-T of omgekeerd aanwijst.

Electrostatische meters berusten op de aantrekking tussen twee ongelijknamig geladen lichamen. Men kan deze meters dus alleen voor het meten van spanningen gebruiken en dan nog wel voor hoge spanningen. Ze hebben het voordeel, hoegenaamd geen energie op te nemen, hetgeen in sommige gevallen een voordeel kan zijn en worden gebruikt voor spanningen in de grootte-orde van enige tientallen kilovolts.

Het meten van weerstanden kan men verrichten met de in fig. 87b getekende brugschakeling van Wheatstone, die als stroombron gebruik kan maken van een accumulatorenbatterij. In een der takken wordt dan een te meten weerstand opgenomen, terwijl in de andere tak een standaardweerstand van vaste waarde is geschakeld. Zo kan b.v. R_1 in fig. 87b de onbekende weerstand zijn, terwijl R_3 de be-

spoelen gaan. Is de brug in evenwicht dan zal inderdaad de getekende toestand van fig. 87a ontstaan, zodat door de spoelen gelijke stromen vloeien (I_1). De richting van hun velden kan men nog vrij kiezen door de wikkelrichting van de spoelen.

Wordt het evenwicht verbroken, hetgeen natuurlijk mogelijk is door slechts één der takken een andere weerstand te geven, dan zal ook door de meter van fig. 87b een stroom gaan vloeien. Dat komt in fig. 87a overeen met verschillende stromen in de spoelen. De ene stroom wordt groter, terwijl de andere juist kleiner wordt en het verschil dezer stromen stroomt door R_2 weg.

Dit nu is juist de bedoeling in de oorspronkelijke figuur 86. Twee der takken bestaan uit zuiver ohmse weerstanden, terwijl de twee andere takken voorzien zijn van zelfinductie. Bij een bepaalde frequentie kan men dus bereiken, dat er evenwicht is in de brugschakeling, maar verandert de frequentie, dan zal het evenwicht worden verbroken. In de evenwichtsstand, die men bij de normale netfrequentie kiest, dus bij 50 Hz, zullen de stromen door de spoelen gelijk zijn. Er ontstaan dus twee velden, die loodrecht op elkaar staan en gelijk van grootte zijn. Het resulterend veld is dus precies verticaal omhoog gericht. Op het draaibare deel van de meter bevindt zich nu ook een magnetisch staafje, dat zich dus zal richten naar het resulterend veld, dus verticaal. De wijzer van de meter staat dus in het midden en op de schaal staat in het midden 50 Hz.

Verandert de frequentie, dan wordt het evenwicht van de brugschakeling verbroken; door de ene spoel vloeit een grotere en door de andere spoel een kleinere stroom, zodat ook de twee loodrecht op elkaar staande velden van grootte veranderen. Ze blijven dus wèl loodrecht op elkaar gericht, maar het ene veld wordt kleiner, terwijl het andere veld juist groter wordt, als gevolg waarvan het resulterende veld van richting zal veranderen. Daardoor draait het magnetische staafje met dat veld mee en dus ook de wijzer van de meter. Men kan natuurlijk een en ander zo inrichten, dat de wijzer bij kleiner wordende frequentie naar links en bij groter wordende frequentie naar rechts uitslaat.

Bijzondere meters.

Wij zullen nu nog enige bijzondere meters in het kort bespreken.

HOOFDSTUK V

De beveiliging van en signalering in hoogspanningsnetten: Relais met en zonder tijdsinstelling - beveiliging tegen overbelasting van netdelen - beveiliging van transformatoren - schakelen, signaleren en meten op afstand - vermindering van het aantal leidingen.

Een belangrijk onderdeel van een hoogspanningsnet is de beveiliging. Hieronder vallen alle apparaten die dienen moeten om het bedrijf veilig en met zo min mogelijk storingen te laten werken.

Daar is dan in de eerste plaats de beveiliging tegen te grote stroomsterkten. In zeer kleine netten kan men gebruik maken van maximaalrelais zonder tijdsinstelling, maar bij enigszins uitgebreide hoogspanningsnetten gaat men hogere eisen stellen. Men gaat daarbij uit van de gedachte, dat een gestoord deel van het net uitgeschakeld moet kunnen worden zonder dat een der niet gestoorde delen daarvan hinder ondervindt. Dit stelt eisen aan de beveiliging, vooral wanneer er vele vertakkingen in het net voorkomen.

In fig. 90 is een eenvoudig geval geschetst, waarbij de centrale C energie levert aan de twee onderstations A en B. De cirkels stellen schakelaars voor (afgezien natuurlijk van de verdere apparaten zoals scheidingsschakelaars, transformatoren, e.d.). Onderstation A kan over de schakelaars 2 en 4 naar twee kanten energie leveren. Onderstation B kan naar drie kanten energie leveren onder tussenschakeling van de schakelaars 5, 6 en 7. Nemen wij nu aan, dat schakelaar 1 uitvalt bij overbelasting boven 250 A, schakelaar 3 boven 200 en 6 boven 150 A, dan zal bij een overbelasting van b.v. 175 A achter 6 deze schakelaar uitvallen. De andere schakelaars blijven echter instaan, zodat deze beveiliging aan de primaire eis voldoet. Indien echter een kortsluiting optreedt achter 6, zullen 6, 3 en 1 alle uitvallen en het gehele net komt zonder spanning te zitten.

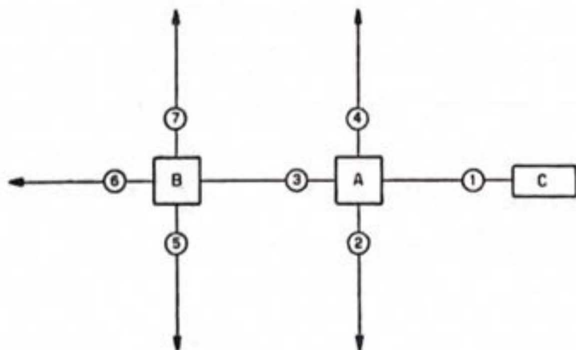


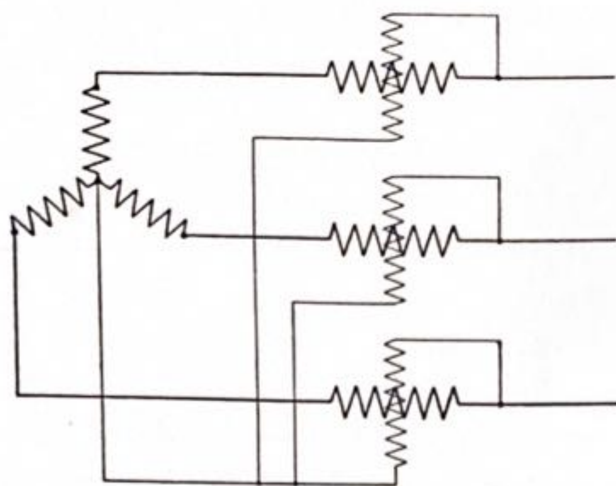
Fig. 90

Bij ongelijk belaste fasen kan men weer drie spoelensystemen in de drie fasen schakelen. Men kan dan aantonen, dat de meter onder bepaalde voorwaarden het totale vermogen aanwijst. In sommige gevallen kan men met twee systemen in ongelijk belaste kabels eveneens het totale vermogen meten.

Voor het meten van verbruik geldt hetzelfde. Alleen zijn de meters dan voor elk systeem met een ferrarisschijf uitgevoerd. De normaalste draaistroomverbruiksmeter heeft dus drie schijven die op dezelfde as zijn gemonteerd. De as drijft dan het telwerk van de meter aan. Daarmee kun je aantonen, dat ook bij ongelijk belaste fasen het telwerk het totale verbruik van de draaistroomaansluiting aangeeft. In sommige gevallen kan van de zojuist genoemde tweewattmetermethode gebruik worden gemaakt, zodat je ook draaistroom-electriciteitsmeters kunt tegenkomen, die maar twee schijven hebben.

Tenslotte kun je in draaistroomkabels met gelijk belaste fasen een verbruiksmeter toepassen met slechts één systeem, dus met maar één schijf, die toch het totale vermogen aangeeft. Een gewone éénfasemeter kan dit dan echter niet zijn, daar in de overbrenging van het telwerk een factor $\sqrt{3}$ moet zijn verwerkt. Door een andere factor toe te passen in de overbrenging van het telwerk kun je deze meetmethode ook nog uitvoeren zonder kunstmatig sterpunt. Bij ongelijk belaste fasen blijft natuurlijk altijd de mogelijkheid bestaan drie afzonderlijke éénfasemeters te gebruiken, die dan wel aan de nulleider geschakeld moeten worden. Het totale verbruik is dan gelijk aan de som van het door de drie meters aangewezen verbruik. Dit gebeurt immers in het groot in elke stad, waar de drie fasen verschillende huizen voeden, die elk hun eigen éénfasemeter hebben.

altijd is dit evenwel nodig. Er zijn meters gemaakt, die drie systemen hebben van stroom- en spanningsspoelen en die een aanwijzing geven die de som voorstelt van de drie gemeten vermogens. De schakeling van een dergelijke meter is natuurlijk vrij eenvoudig en ziet er uit als in fig. 88. Wanneer inmiddels de drie fasen van een net gelijk zijn belast, hetgeen b.v. het geval zal zijn wanneer alleen draaistroomaansluitingen (motoren) op het net voorkomen, dan is het meten van het vermogen in slechts één der fasen voldoende. Het totale vermogen is dan $\sqrt{3}$ maal het gemeten vermogen van één fase. In netten, die slechts drie faseaders hebben moet men in zo'n geval een kunstmatig sterpunt maken, zoals in fig. 89 is aangegeven. Het kunstmatig sterpunt kan met drie gelijke weerstanden worden gemaakt. Juist in draaistroomnetten met gelijk belaste fasen zul je vaak een nulleider missen! Inmiddels is het ook mogelijk de stroomspoel in één fase-ader te schakelen en de spanningsspoel tussen die ader en een der andere aders. Met verrekening van fasehoeken en een factor $\sqrt{3}$ voor de te hoge spanning is het dan mogelijk in één fase het vermogen voor de drie fasen te meten.


Fig. 88

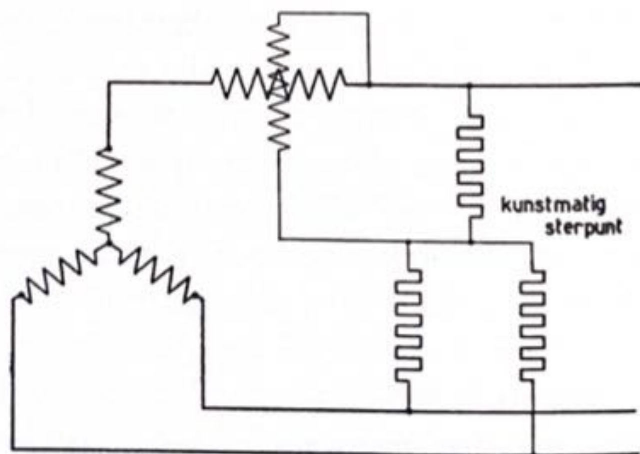


Fig. 89

verdwenen, daar een blikseminslag slechts kort duurt. Er bestaat dan een inrichting, die de spanning weer op de lijn inschakelt, zodat het uitvallen van de spanning slechts enkele seconden behoeft te duren. Het kan ook nog zijn, dat een draad permanent gestoord is, hetgeen b.v. ook bij draadbreuk het geval zal zijn. De spanning kan dan weer geschakeld worden op de tweede parallelleiding (er zijn altijd twee maal drie fasedraden, dus tweemaal een draaistroomlijn). Men heeft dan echter een inrichting nodig, die vóór het wederinschakelen nagaat welke der twee lijnen eventueel niet gestoord is.

De beveiliging van lijnen, welke niet eenvoudig vertakte leidingen zijn, zoals in fig. 90 schematisch is voorgesteld, is veel lastiger. Dergelijke leidingen kunnen b.v. leidingen zijn die op verschillende punten hun voeding ontvangen, terwijl er ook ringleidingen zijn, die door eenvoudige schakeling omgeschakeld kunnen worden tot twee parallelle leidingen. Voor de beveiliging van transformatoren gebruikt men soms maximaal schakelaars voor het geval de wikkeling van de transformator defect raakt. De maximaalschakelaar zal echter pas bij een behoorlijke overstroom uitschakelen, en dat kan voor de transformator overbodige beschadiging tot gevolg hebben. Voor transformatorbeveiliging kan men dan gebruik maken van de differentiaalbeveiliging. In fig. 91 is het principe van deze beveiliging weergegeven. Zowel aan de primaire als aan de secundaire kant van de transformator wordt een stroomtransformator in serie met een der fasedraden geschakeld. De verhoudingen van de stroomtransformatoren zijn zodanig gekozen, dat de secundaire stromen in beide gevallen en bij elke belasting gelijk zijn. Maar zodra in de transformator een gedeeltelijke kortsluiting optreedt wordt de primaire stroom van de beschadigde fase groter, waardoor de primaire en secundaire stromen niet meer dezelfde verhouding hebben, met het gevolg, dat de secundaire stromen van beide stroomtransformatoren niet meer gelijk zijn. Met behulp van de verschilstroom wordt dan een relais

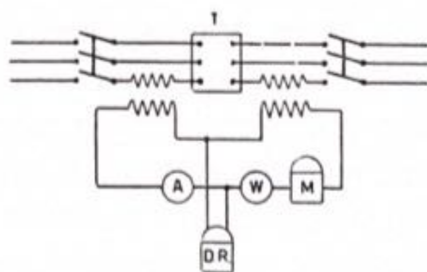


Fig. 91. M = maximaal-relais
DR = differentiaal-relais

beterde constructies toegepast, waardoor het mogelijk is de schakelaars voor lagere stromen afhankelijke tijdsinstelling te geven, doch waarbij voor hogere stroomsterkten de uitschakeltijd niet meer afhankelijk is van de stroomsterkte. Men spreekt dan van begrensd afhankelijke tijdsinstelling.

De maximaaluitschakeling van de olieschakelaars kan direct geschieden. Hierbij is dan op de schakelaar een mechanisme aangebracht dat reageert zodra de stroom een bepaalde sterkte overschrijdt. Moderne olieschakelaars voor groot vermogen zijn echter geweldig zware dingen, waardoor het uitschakelen langs directe weg bezwaarlijk wordt.

Men kan relais gebruiken, die op een stroomtransformator zijn aangesloten. Bij normale stroomsterkten zal de secundaire kant van de stroomtransformator gesloten zijn met behulp van contacten van het maximaalrelais. Wanneer het relais in werking treedt door overbelasting, zal het zijn contacten openen en zal dus de secundaire kant van de stroomtransformator worden geopend. Over de secundaire kant van de transformator is echter aangesloten de uitschakelmagneet van de olieschakelaar, die dus nu bekrachtigd wordt, waarop de olieschakelaar uitvalt. Het voordeel van deze methode is, dat men voor het uitschakelen niet afhankelijk is van een vreemde stroombron.

Men kan ook gebruik maken van spanningstransformatoren. De magneet van de olieschakelaar wordt dan doorlopend bekrachtigd. Zodra de spanning zakt zal het relais aangesloten op de spanningstransformator gaan werken, waardoor de magneet van de olieschakelaar wordt uitgeschakeld en de olieschakelaar uitvalt. Het voordeel van deze methode is, dat de olieschakelaar ook uitvalt wanneer de spanning op het net niet door een overbelasting wegvalt. Men spreekt dan ook van nulspanningsbeveiliging. Deze wordt soms verlangd.

Behalve de beveiliging tegen overstromen kent men nog vele andere vormen van beveiliging. Indien een hoogspanningslijn b.v. door blikseminslag getroffen wordt, waarbij dus een overspanning ontstaat, welke kort duurt, zal het mogelijk zijn, dat de lijn wordt uitgeschakeld. Direct na de uitschakeling is echter de overspanning

Om dit te voorkomen maakt men de schakelaars behalve afhankelijk van de stroomsterkte ook afhankelijk van de tijd. Er zijn twee soorten tijdsafhankelijkheid. Men onderscheidt de afhankelijke en de onafhankelijke tijduitschakeling.

Bij de onafhankelijke tijdschakelaars kan de tijd ingesteld worden, onafhankelijk van de stroomsterkte, waarbij de schakelaar uitvalt. Bij overschrijding van deze stroomsterkte begint de tijdinstelling te werken en na de ingestelde tijd valt de schakelaar pas uit. Zo kan men in het net van fig. 90 de volgende tijdsinstelling kiezen: 1 op 5 seconden, 3 op 4 seconden en 6 op 3 seconden. In dat geval zal bij een kortsluiting achter 6 de tijdsinstelling van de drie schakelaars 1, 3 en 6 gaan werken. Na drie seconden valt dan schakelaar 6 uit, waarna de storing is opgeheven voor het resterend deel van het net, dat nog onder spanning staat.

De beveiligingsschakelaars worden ook afhankelijk van de stroomsterkte ingesteld en wel zo, dat de schakelaars, die het dichtst bij de centrale staan een hogere stroominstelling krijgen. Bij een geringe overbelasting valt dan alleen het laagst ingestelde relais uit. De tijdsinstelling dient dus om te zorgen, dat alleen het gestoorde gedeelte uitvalt, terwijl de stroominstelling beveiligt tegen overbelastingen.

Bij een kortsluiting tussen de centrale en onderstation A zal het dus bij de genoemde tijdsinstelling 5 seconden duren, alvorens uitgeschakeld wordt, hetgeen minder prettig is voor de centrale. De centrale wil dan de uitschakeling in dat geval sneller laten geschieden, terwijl een verbruiker achter schakelaar 7 verlangt, dat bij kortsluiting de netspanning niet uitvalt door het uitvallen van de schakelaars 3 of 1.

Men moet dus komen tot een lange uitschakeltijd bij kleine overbelastingen, terwijl bij grotere overbelastingen de uitschakeltijd korter moet worden. De uitschakeltijd moet dus afhankelijk worden gesteld van de mate van overbelasting, dus van de overstroom. Hiertoe kan dienen de afhankelijke tijdsinstelling.

Het nadeel van de afhankelijke tijdsinstelling is, dat bij hoge uitschakelstromen de tijdsverschillen tussen de schakelaars zeer klein worden, waardoor de eerstgenoemde eis van slechts uitvallen van het gestoorde gedeelte in gevaar komt. Men heeft daarom ook ver-

In het algemeen zal men verlangen, dat men bij afstandbediening onmiddellijk kan nagaan of Sc in- of uitgeschakeld is. Daarvoor kan men een signaallamp gebruiken, waarbij geen extra signaalleidingen nodig zijn wanneer men de lamp tussen de punten a en b schakelt. De lamp staat dan parallel aan de spoel van de schakelaar, zodat dit een behoorlijk veilige contrôle vormt.

Zodra het aantal schakelingen groot wordt gaat men proberen met minder leidingen uit te komen dan door vermenigvuldiging van de enkele schakeling het geval zou zijn. Daarvoor zijn er verschillende mogelijkheden.

In de eerste plaats kan men gebruik maken van de zgn. kanalencombinatie. Hierbij verstaat men onder een kanaal een geleiding waarover het mogelijk is op een bepaald ogenblik één handeling

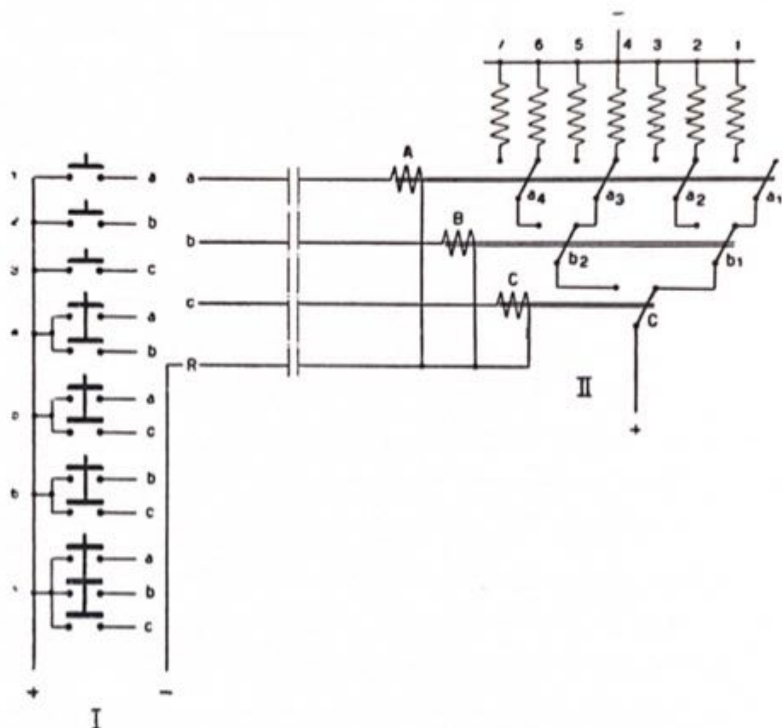


Fig. 93

te verrichten. Door combinaties te vormen tussen verschillende dezer geleidingen kan men over een aantal kanalen een veelvoud van handelingen verrichten. In fig. 93 is als voorbeeld een systeem met kanalencombinatie met drie kanalen getekend, terwijl zoveel mogelijk combinaties zijn toegepast. Er zijn drie kanalen bestaande uit

veroorzaakt het weigeren van een onderdeel in een telefooncentrale slechts één verkeerde verbinding, in de sterkstroomtechniek kan een foutieve schakeling funeste gevolgen hebben. Het is echter mogelijk de principes van de telefonie uit te werken voor zwaarder geconstrueerde toestellen, terwijl in het algemeen deze toestellen voor het doel waarvoor zij gemaakt zijn niet zo snel behoeven te werken als in de telefonie het geval is, waardoor hun toleranties iets ruimer gekozen kunnen worden.

Een eerste stap op het gebied van het op afstand schakelen is in fig. 92 weergegeven. Op de commandoplaats I moet de schakelaar Sc op plaats II op afstand in- en uitgeschakeld kunnen worden. Daartoe wordt gebruik gemaakt van een stuurstroom, die geleverd wordt door transformator T (wisselstroom) en bediend kan worden door de schakelaars A en B. De schakelaar Sc heeft een inschakelspoel Sp. Indien nu knop A wordt ingedrukt, zal de spoel Sp bekrachtigd worden en de schakelaar komt in. Bij het loslaten van de drukknop A moet de schakelaar in blijven. Daartoe is op de schakelaar, behalve de contacten voor het sluiten van de hoofdstroom, een extra contactenpaar p en q aangebracht. Deze contacten kunnen veel lichter worden uitgevoerd dan die voor de hoofdstroom. Is de schakelaar eenmaal gesloten en wordt knop A losgelaten, dan zal de schakelaar in blijven omdat de spoel aangesloten blijft op de stuurstroom over de contacten p en q. Moet de schakelaar weer worden uitgeschakeld, dan kan men knop B indrukken, waardoor de stroomkring van spoel Sp even wordt onderbroken. De schakelaar Sc valt dan uit en blijft ook na het loslaten van knop B uit, daar de contacten p en q onderbroken zijn. Deze inrichting wordt vaak toegepast voor het in- en uitschakelen van motoren, al kan daarbij niet van afstandbediening worden gesproken omdat de schakelaar bij de motor zelf is aangebracht. De schakeling kan echter met evenveel gemak voor afstandbediening worden gebruikt.

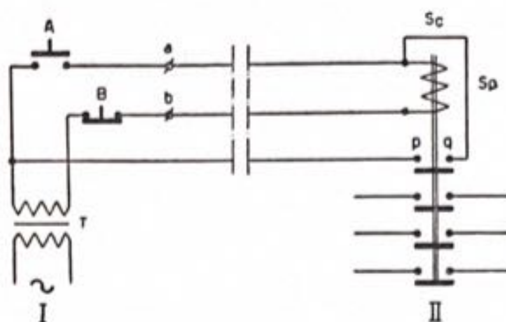


Fig. 92

bekrachtigd, die de olieschakelaar van de transformator uitschakelt. Het spreekt vanzelf, dat de stroomtransformatoren bij deze schakeling aan bijzondere eisen moeten voldoen wat betreft hun karakteristiek, omdat onder verschillende belastingen van de hoofdtransformator, zolang deze geen defect vertoont, de secundaire stromen gelijk moeten blijven om te voorkomen, dat de hoofdtransformator onnodig uitvalt.

Een belangrijk hulpmiddel bij de beveiliging van hoogspanningsnetten vormt het schakelen, signaleren en meten op afstand. Vroeger werden schakelhandelingen ter plaatse door bedienend personeel verricht. Toen de omvang van de netten echter toenam werd het nodig het geheel vanuit een centraal punt te kunnen overzien. Vanuit dit punt werden dan de aanwijzingen voor het verrichten van schakelingen gegeven. Dit ging met behulp van telefoonverbindingen of andere signaal-installaties; de handelingen (het schakelen, het aflezen van meters, enz.) werden dan door mensen ter plaatse uitgevoerd en naar en van het centrale commandopunt gesignaleerd.

Later werd het noodzakelijk de handeling vanuit het centrale punt zelf te verrichten; uit economische overwegingen om personeel uit te sparen en uit practische overwegingen omdat het schakelen sneller moest geschieden.

Voor het op afstand in- en uitschakelen maakt men gebruik van hulp-leidingen die van het centrale punt naar de plaats van handeling lopen. Meestal heeft men een apart net, dat een stuurstroom kan leveren en dat met een eigen spanning kan werken. Naarmate het aantal schakelingen echter toeneemt stijgt ook het aantal hulpleidingen en al gauw is men naar middelen gaan zoeken om dit aantal (alleen al uit economisch oogpunt) te beperken. Zo is dan een heel aparte techniek ontstaan, die veel van de automatische telefonie overneemt en tegenwoordig zelfs gebruik gaat maken van electronenbuizen.

De eerste eis voor afstandbediening is wel dat de installatie betrouwbaar moet werken. De toestellen die in dit deel van het bedrijf worden gebruikt zijn, zoals we reeds opmerkten, voor een groot deel ontleend aan de telefonie. In de sterkstroomtechniek vindt men deze toestellen niet erg betrouwbaar en is men gewend met meer robuste apparaten te werken. Er hangt dan ook meer van af want

relais a bij plaats II bekrachtigd worden zodra de synchroon draaiende schakelaars op de desbetreffende contacten komen. Er ontstaat dan een schakelstoot door de enige leiding.

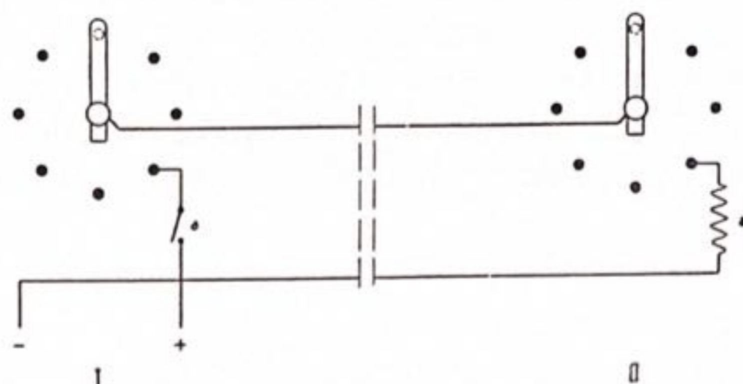


Fig. 95

Nog vele andere combinaties zijn mogelijk en zoals gezegd het op afstand schakelen vormt een vak op zichzelf.

Het signaleren kent eveneens vele variaties. De eerste eis is wel, dat het systeem dat men kiest betrouwbaar moet zijn en daarom zijn vele systemen die mogelijkheden boden verlaten, omdat fouten niet altijd te vermijden waren.

Voor het meten op afstand heeft men vele methoden. Soms past men systemen toe waarbij impulstreinen over leidingen worden gestuurd. Vaak wordt een leiding doorlopend gebruikt en wordt een of andere brugschakeling aangewend met tussenschakeling van de leiding. Belangrijk zijn de afstandmetingen voor het overbrengen van het verbruik op een bepaalde plaats. Er zijn veel schakelingen uitgedacht voor het sommeren van verbruiken uit verschillende delen van het net.

In vele gevallen kan men profiteren van telefoonleidingen voor het overbrengen van de signalen voor afstandschakelen en -meten. Het hangt af van de spanning, die men gebruikt, of toepassing van telefoonkabels mogelijk is. Een electriciteitsbedrijf beschikt over een eigen telefoonnet, dat weliswaar wat het aantal toestellen betreft kleiner is dan het P.T.T.-net, maar wat betreft de mogelijkheden en de ingewikkeldheid daar zeker niet voor onderdoet. Het belang van het eigen telefoonnet blijkt b.v. bij het optreden van storingen. Het is dan mogelijk in korte tijd alle voor het opheffen van de storing belangrijke mensen te bereiken en uit hun gegevens de aard van de storing op te maken. Het zgn. confereren, waarbij meer dan

Een bezwaar kan nog zijn, dat twee combinaties nodig zijn voor in- en uitschakelen op afstand. Op relais 6 vindt men nl. nog contacten, die in fig. 94 niet zijn getekend en die bestemd zijn voor het inschakelen van het eigenlijke toestel, dat men op afstand wenst te bedienen. Voor het uitschakelen van dat toestel, dus van relais 6, heeft men een nieuwe combinatie, nl. combinatie 7 nodig.

Het is vrij gemakkelijk dit te verhelpen door een schakeling met twee relais, die samenwerken en waarbij één hiervan de contacten voor het inschakelen van het toestel heeft. De schakeling zullen wij hier niet beschrijven, daar dit te ver zou voeren, maar zij voldoet zeer betrouwbaar aan de eis in te schakelen bij verbinding met de + van de plaatselijke batterij en uit te schakelen bij opnieuw verbinden met de +. Zo kan men verder gaan en door knop 6 bij I neer te drukken kan men dus om en om in- en uitschakelen. Hoe lang men de knop neerdrukt is niet van belang, zodat dit geen bijzondere eis aan de bediening stelt. Met deze schakeling kan men in het geval van fig. 93 dus 7 in- en uitschakelingen over 3 + 1 draden uitvoeren. Dit kost natuurlijk relais bij plaats II, maar wanneer het om grotere afstanden gaat zullen de kosten van de relais zeker gerechtvaardigd zijn door de besparingen op de kabels. Bij een groter aantal schakelingen wordt het systeem interessanter omdat het aantal handelingen, dat over p draden kan worden uitgevoerd, gelijk is aan $2^{(p-1)}-1$. Zo vind je dus, dat bij slechts 8 draden, waarvan één als retourleiding moet dienen (vandaar die -1 in de exponent van de macht van 2!) : $2^7-1 = 127$ mogelijkheden!

Het systeem met twee draden met kiezerbedrijf verschilt in principe niets van de automatische telefonie.

Men kent nog vele andere mogelijkheden zoals synchroon draaiende schakelaars aan beide einden van de kabel. In fig. 95 is dit kort aangegeven. Twee schakelaars draaien snel rond, terwijl ervoor gezorgd wordt dat zij synchroon draaien en steeds overeenkomstige standen aan beide zijden innemen. Aan de vele contacten van de schakelaar zijn bij I schakelaars verbonden, die het desbetreffende contact met de + van een plaatselijke batterij kunnen verbinden. Aan de contacten van de schakelaar bij II zijn relais verbonden of combinaties van relais, die de toestellen kunnen in- en uitschakelen. Indien men nu in fig. 95 een der schakelaars b.v. a inschakelt, zal

de geleiders a, b en c. De vierde geleider is de gemeenschappelijke retourleiding R. Met de schakelaars 1 t/m 7 kan men de kanalen a, b en c op alle mogelijke manieren alleen of in combinaties met elkaar met de + verbinden.

Aan het andere einde van de draden zijn de relais A, B en C met de respectievelijke kanalen verbonden en met de gemeenschappelijke retourleiding R. De relais hebben zgn. wisselcontacten, die dus twee standen hebben. In de ruststand zijn geen van de drie relais bekrachtigd. De contacten van deze relais nemen een zodanige stand in, dat de + van de plaatselijke batterij geen verbinding heeft met een toestel.

Nemen wij als voorbeeld het inschakelen van 6. Daarbij worden dus bij het neerdrukken van knop 6 op plaats I de geleiders b en c met de + verbonden, zodat de relais B en C op plaats II bekrachtigd worden. De contacten van deze relais worden dan omgezet voor de tijd dat knop 6 op plaats A wordt neergedrukt. Nu wordt bij II toestel 6 inderdaad ingeschakeld, want het wordt met de + verbonden en is zelf al met de – van de plaatselijke batterij verbonden. De stroomloop is daarbij als volgt: + over contact c over contact b_2 dat eveneens omgezet is, zodat de stroom verder gaat naar contact a_4, dat niet is omgezet, zodat toestel 6 wordt ingeschakeld.

Nu moet het mogelijk zijn knop 6 bij I weer los te laten teneinde de leidingen vrij te maken voor eventuele andere schakelingen. Daarom zijn de toestellen 1 t/m 7 in II voorgesteld door spoelen van relais, die weer het eigenlijke toestel inschakelen. De relais kunnen b.v. geschakeld zijn als in fig. 94. Relais 6 blijft in zodra het eenmaal is ingeschakeld en kan worden uitgeschakeld door relais 7 te bekrachtigen. Relais 6 zal zich nl. door een zgn. vasthoudketen, dat het zelf sluit, ingeschakeld houden over de verbreekcontacten van relais 7. Dit zijn contacten, die juist gesloten zijn wanneer het relais in rust is en opengaan zodra het relais wordt bekrachtigd. Wordt dus handeling 7 verricht, dan verbreekt men even de vasthoudketen van relais 6, dat dus uitvalt en uit blijft, omdat de vasthoudcontacten eenmaal geopend zijn.

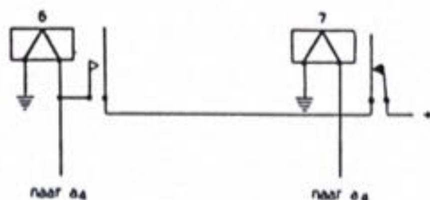


Fig. 94

ondergrondse spoorweg van Parijs, waar de stroomtoevoer plaats heeft met een zgn. derde rail, een railvormige staaf, die naast de spoorbaan is gemonteerd en waarvan de stroom met schoenvormige stroomafnemers wordt afgenomen. Het publiek kan echter op geen enkele plaats op de spoorbaan komen; overgangen komen niet voor anders dan door tunnels, die boven of onder de spoortunnel zijn geplaatst.

Een ander voorbeeld van ondergronds stroomafnemen vormden vóór 1936 de electrische trams in Parijs. Weliswaar waren er trajecten, die voorzien waren van electrische draden, zoals je die normaal bij trams ziet, maar vele trajecten waren in het midden tussen de rails voorzien van een gleuf. De stroomrail bevond zich niet onder deze gleuf, daar het anders mogelijk zou zijn geweest met behulp van een stok of iets dergelijks in aanraking met de electrische spanning te komen, maar opzij van de gleuf (fig. 96). De stroomafnemer werd door de gleuf omlaag *gedraaid* in plaats van geschoven. Deze methode van stroomafnemen wordt vrij kostbaar, vooral door de aanwezigheid van wissels en kruisstukken.

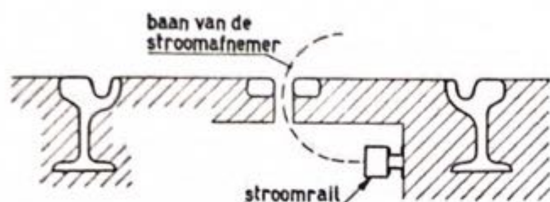


Fig. 96

Niettemin heeft men dat toentertijd in Parijs gedaan om het stadsschoon niet te veel met draden te ontsieren. In 1936 zijn inmiddels om verkeerstechnische redenen alle trams uit Parijs verdwenen.

Bij spoorbanen, waar de snelheden veel groter zijn dan bij stadstrams kan men dergelijke grapjes natuurlijk niet toepassen, terwijl stroomtoevoer over een derde rail niet kan, omdat dan geen enkele spoorwegovergang uit veiligheidsoverwegingen mogelijk zou zijn. Toch maakt men van draadleiding gebruik, al is de constructie principieel verschillend van die van de trams.

In fig. 97a zie je het principe van de draadophanging bij de stadstram. Er wordt gewerkt met een enkele draad, die van punt tot punt gespannen is. Nu is het volkomen onmogelijk een draad tussen twee punten horizontaal op te hangen. De draad heeft altijd enig gewicht en dit gewicht veroorzaakt een zekere doorhang, die men niet onbeperkt klein kan maken. Een dikkere draad brengt geen

HOOFDSTUK VI

Electrische tractie: Electrische tractie tegenover stoomtractie - wanneer electrische tractie wordt toegepast - stadstram - tractie met electrische locomotieven - tractie met treinstellen, waarbij de aandrijving verdeeld is - keuze van rijspanning - bouw van de bovenleiding - beveiliging tegen hoogspanning - beveiliging tegen blikseminslag en schakelstoten - stuurstroomschakelingen - koppelen van treinstellen met centrale besturing - volgordewals - dodemanshandle - remmen met luchtdruk - electrisch remmen op weerstanden - recuperatie van electrische energie.

Onder electrische tractie verstaat men het verkeer met voertuigen, die door electrische energie worden aangedreven. Daaronder vallen niet alleen de electrische trams en treinen maar ook de electrische autobussen (trolleybussen) en, om een „klein" voorbeeld te noemen, de electrokarren, die als perronwagentje voor het verplaatsen van bagage worden gebruikt.

Vroeger werd de electrische energie daarvoor betrokken van accumulatoren, die meegevoerd werden, in Duitsland o.a., maar de toenemende vraag naar motorvermogen heeft de accumulator verdrongen, omdat het te kostbaar werd, zowel door het betrekkelijk grote gewicht als door de hoge onderhoudskosten van deze soort accumulatoren. Toch vind je thans nog een voorbeeld van deze accumulatorentractie: de zojuist genoemde electrokarren.

Voor het verkeer echter voert men tegenwoordig algemeen de electrische energie door middel van een boven- of ondergrondse draad of staaf. Een ondergrondse stroomtoevoer heeft enkele bezwaren. Daar de spanning van het tractienet in het algemeen hoog is moeten alle voorzorgen worden genomen, dat mens of dier niet in aanraking met de stroomdraad kan komen. Het wordt dan een vrij lastige opgave een stroomdraad te maken, die aan de veiligheidseisen voldoet èn niet te duur in aanleg en onderhoud is.

Indien men er in slaagt de kosten van de veiligheidsvoorzorgen te verminderen, zal al gauw de ondergrondse stroomtoevoer goedkoper worden dan die met bovenleiding. Allereerst kunnen de masten worden gemist, terwijl het in het algemeen gemakkelijker is een stevige stroomtoevoerdraad te maken, die laag bij de grond of ondergronds kan worden gelegd. Een voorbeeld hiervan is de

twee personen telefonisch met elkaar moeten kunnen spreken is daarbij van belang en vereist speciale schakelingen.

In enkele gevallen maakt men voor signalering al gebruik van radiobuizen. De bedoeling is metingen en schakelingen op afstand over te brengen met behulp van draaggolven via de hoogspanningslijnen. Dit vereist natuurlijk een kostbare apparatuur maar geen extra kabels. Men kan op deze manier tientallen kanalen maken, door voor de draaggolven steeds andere frequenties te kiezen.

aantal voedingspunten zal dus in het algemeen bepaald worden door de toelaatbare spanningsval in de leidingen. Deze is niet te verwaarlozen. Reeds bij de bestaande systemen varieert de spanning van 1350 tot 1550 V, afhankelijk of je je bij het voedingspunt of op de grootste afstand van de voedingspunten bevindt.

Voor stadstrams kiest men een lagere spanning hetgeen ook mogelijk is, daar de over te brengen vermogens niet zo groot zijn. In de regel zal de spanning 500 tot 600 volt bedragen. Soms komen in de stad spanningen van 1000 V voor. Voor interlocale trams past men hogere spanningen toe b.v. 1200 V. Sommige trams kunnen op twee spanningen rijden (waarbij dan de motoren parallel of in serie worden geschakeld). Buiten de stad rijdt men dan met 1200 Volt en in de stad met 600 V. Een automaat zorgt ervoor, dat op de motoren een te hoge spanning kan komen, wanneer de bestuurder eens mocht vergeten tijdig over te schakelen!

In sommige gevallen heeft men in het buitenland voor electrische treinen 3000 V gekozen.

De keuze van de stroomsoort en spanning is niet willekeurig. Zij hangt af van de omstandigheden. Stel je voor dat je een electrische trein wilt aanleggen in een streek, die dun bevolkt is. De afstanden tussen de steden zullen daarom groot zijn en het aantal passagiers per dag in het algemeen laag. Dit betekent dus een kleine frequentie van de treinen (de frequentie is het aantal treinen per tijdseenheid, een dag b.v.). De kosten van de electrische installatie (voedingsstation, bovenleiding, enz.) drukken dus op een klein aantal treinen. In een dichtbevolkte streek zullen afstanden tussen de bevolkingscentra daarentegen klein zijn en het aantal passagiers per dag per traject groot. De passagiers leggen wel geen grote afstanden af, maar ze wisselen elkaar af en de plaatsen in de treinen zijn doorlopend bezet. In dat geval zullen de vaste kosten van bovenleiding enz. op méér treinen drukken. Gelijkstroomtractie zal verscheidene dure onderstations vereisen (verscheidene, omdat de spanning beperkt is, duur omdat in deze stations getransformeerd èn gelijkgericht moet worden). Deze onderstations kunnen bekostigd worden bij een grote treinfrequentie, doch bij een kleinere treinfrequentie zal men misschien overgaan tot wisselstroomtractie, waarbij de onderstations minder op de vaste kosten drukken, omdat

Van groot belang zijn de stroomsoort en de spanning waarop wordt gereden. Als stroomsoort kan men vrijwel kiezen tussen gelijk- en éénfase-wisselstroom. Daar echter alleen gelijkstroommotoren zich eenvoudig in toerental laten regelen en dit voor de snelheidsregeling nodig is gebruikt men het liefst gelijkstroom. Een bezwaar is echter, dat gelijkstroommachines alleen gemaakt kunnen worden voor spanningen tot 2 à 3000 volt. Reeds voor spanningen boven 1500 à 2000 volt krijgt men last van vonken aan de collector. In de practijk zal men dus met een betrekkelijk lage spanning genoegen moeten nemen. Zou men de spanning willen verhogen (om de stroom door de toevoerdraad bij een gegeven vermogen klein te houden) dan zou men moeten overgaan op éénfase-wisselstroom. Dit kan inderdaad gebeuren, maar dat heeft vele nadelen. Men zou ook in de trein de spanning omlaag kunnen transformeren en daarna gelijkrichten, maar dat betekent weer een kostbare apparatuur, een tamelijk laag rendement en ballast in de trein.

Eénfase wisselstroom wordt in Nederland niet gebruikt. Zowel in Duitsland als in Zwitserland komt men echter éénfasewisselstroom tegen. De spanning is dan meestal ongeveer 15000 volt wisselspanning met een frequentie van 16 Hz. Als motoren worden speciale typen gebruikt zoals de repulsie en Deri-motoren, waarvan de toerentallen nog kunnen worden gevarieerd.

Men kan eventueel ook gebruik maken van draaistroom. Die vereist twee bovenleidingen, terwijl de rails als derde ader dienst doet. Natuurlijk zijn de rails geaard en de aarding van het draaistroomnet geschiedt dus aan een der fasepunten, hetgeen op zichzelf geen bezwaar is. Draaistroomtractie komt voor in Zwitserland en Italië.

Bij gelijkstroomtractie zal men dus gebonden zijn aan een beperkte spanning. In de regel kiest men een spanning van 1500 volt. Daar een bepaald vermogen moet worden overgebracht zal de stroomsterkte in de bovenleiding niet verder beperkt kunnen worden. Men kan evenwel de dikte van de rijdraden niet onbeperkt vergroten. Een te grote stroomsterkte betekent echter een te groot spanningsverlies, wanneer een trein zich op een punt bevindt dat ver gelegen is van het voedingspunt van het net. Daarom zal men genoodzaakt zijn verschillende voedingspunten aan te brengen. Het

uitkomst: die weegt immers per lengte-eenheid meer! Je zou dan ook je toevlucht moeten nemen tot andere materialen, hetgeen heel wat geld zou gaan kosten. Bovendien wordt de constructie van de

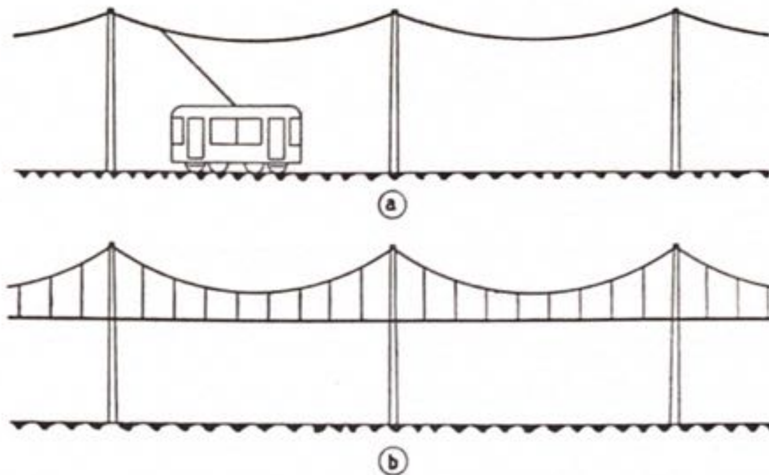


Fig. 97

ophangpunten veel kostbaarder, vooral op die punten waar een bocht voorkomt. Op een recht traject zal een paal naar beide zijden even hard aangetrokken worden: de zijdelings trekkende krachten heffen elkaar op en er blijft alleen een kracht die de paal in de grond tracht te drukken, hetgeen geen bezwaar is. Bij een bocht echter werken de zijdelingse krachten niet in dezelfde richting, maar zij staan t.o.v. elkaar onder een hoek. Het resultaat is, dat daar de paal wel degelijk in zijdelingse richting wordt aangetrokken, en dus tegen omtrekken moet worden versterkt.

Tijdens het rijden zal de tram dan ook de doorhangende draad enigszins omhoog drukken, doordat de stroomafnemer voorzien is van een veer, die hem tegen de draad gedrukt houdt. De kracht hiervoor beschikbaar is vrij groot, omdat in de eerste plaats moet worden gezorgd voor een goed contact.

Bij electrische treinen is de snelheid veel groter en is de enkelvoudige draadophanging vervangen door een zgn. kettingophanging, die het mogelijk maakt de eigenlijke rijdraad werkelijk horizontaal te houden. In fig. 97b zie je dat de ophangdraad de nodige doorhang krijgt, terwijl aan deze draad de stroomdraad is opgehangen door middel van verticale draden, die nauwkeurig op lengte zijn gemaakt.

Men spant echter alleen twee draden waar heel veel trams tegelijkertijd kunnen worden verwacht.

Daar de rails als tweede leiding worden gebruikt moeten zij electrisch behoorlijk contact maken, daar anders de overgangsweerstand tussen de rails zo groot wordt dat er in het railnetwerk te veel spanningsverlies optreedt. Er is echter nog een andere reden waarom men geen spanningsverlies in tramrails wenst. Wanneer je een bepaald spanningsverlies krijgt heb je geen garantie, dat de stroom werkelijk geheel door de rails vloeit. Er ontstaat een stroomverdeling, waarbij de stroom wel in hoofdzaak door de rails naar de centrale terugvloeit, maar gedeeltelijk ook door metalen buizen voor gas enz., welke eveneens onder het oppervlak van de straat zijn aangebracht. Deze kostbare buizen zijn voor lange tijd geplaatst en zouden dus bij beschadiging eerder moeten worden vernieuwd, waarmee grote bedragen zijn gemoeid.

De electrische stromen, die eventueel door de buizen terugvloeien beschadigen de buizen in zoverre, dat electrolyse kan ontstaan. In fig. 98 is schematisch aangegeven hoe deze vagebonderende stromen, zoals de stromen worden genoemd, die buiten de rails om terugkeren, door een in de buurt van de rails gelegen metalen buis vloeien. Door de in de aarde aanwezige verbindingen kan electrolyse ontstaan, waardoor het materiaal van de buis wordt aangetast. De rails moeten daarom zodanig met elkaar worden verbonden, dat op elk punt van het net de spanning t.o.v. aarde een maximale waarde van enkele volts niet overschrijdt. Ze worden daarom vaak met blanke kabels met elkaar verbonden. Daar deze verbindingen nauwkeurig moeten worden uitgevoerd betekent dit weer een verhoging van de kosten voor aanleg en onderhoud.

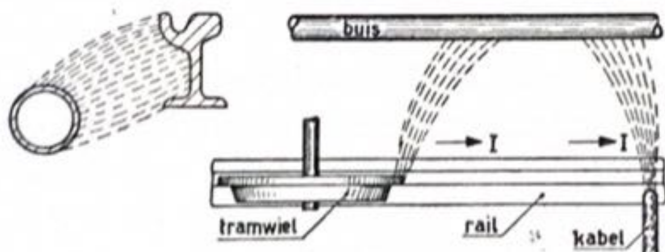


Fig. 98

De vorm van de rijdraad is meestal zo, dat hij gemakkelijk kan worden opgehangen. Deze spanning moet natuurlijk zodanig geschieden, dat de stroomafnemer zonder bezwaren onder het ophang-

Zij hebben het voordeel, dat zij bij het veranderen van rijrichting niet behoeven te worden gedraaid.

Bij trams maakt men gebruik van de rails als tweede geleider. Dit verklaart b.v. het vonken onder de wielen, wanneer de rails erg vuil zijn. De stroom wordt daar dan telkens even onderbroken. Daar er echter bij een normale motorwagen vier wielen zijn en het gewicht van de wagens tegenwoordig voldoende groot is om een behoorlijke contactdruk te garanderen heeft men daar geen last van. Zo is er dus ook geen gevaar, dat je bij het instappen een schok krijgt, wat niet ondenkbaar zou zijn, wanneer de vier wielen toevallig op slechte contactpunten zouden rusten. De spanningsval over deze contactpunten zou dan wel eens een paar honderd volt kunnen bedragen en dit is de spanning, die je zou aanraken op het moment, dat je het handvat aanpakt en nog op de grond staat. Wèl gevaarlijk is het een tram, die ontspoord is aan te raken voordat je zeker weet, dat de stroomafnemer van de draad is. De wagen staat dan nl. helemaal niet meer met de rails in verbinding en indien de motoren nog ingeschakeld staan, of alleen maar de verlichting zul je een schok van de volle 500 V oplopen! Ontspoort dus een tram dan is het wel degelijk zaak uit te kijken bij het uitstappen of eruit te springen.

Bij het werken aan de bovendraad (die doorlopend moet worden gecontroleerd) maakt men gebruik van torenwagens of hoge houten ladders, die voldoende tegen aarde zijn geïsoleerd om schokvrij werken mogelijk te maken.

De voeding van het electrische net geschiedt op verschillende punten, omdat de draaddikte van de bovenleiding beperkt is, terwijl de spanningsval niet te groot mag worden. Men voedt dan de bovenleiding op die punten met behulp van dikkere kabels, die ondergronds naar de voedingspunten worden gevoerd. Het aantal voedingspunten per lengte van de tramweg hangt van het aantal tramwagens af dat men op een bepaald traject kan verwachten; van de vraag b.v. of méér lijnen over één traject gaan of niet. In enkele gevallen spant men niet één maar twee draden naast elkaar als bovenleiding. Zonder de draaddikte te groot te maken kan men dan meer stroom overbrengen. Een voordeel is dan ook nog, dat de stroomafnemer op twee punten contact maakt in plaats van op één.

zij kleiner in aantal kunnen zijn (hoge spanning) en goedkoper (zij transformeren alleen). Tenslotte komt natuurlijk ook het ogenblik, dat de frequentie zo laag is, dat electrische tractie niet meer loont en wanneer men dan in de toekomst geen stoomtractie wil gebruiken, zal men diesel-electrische tractie moeten toepassen. Dit is b.v. al lang het geval in Amerika waar op de zeer lange trajecten de frequentie betrekkelijk laag is.

De keuze van de motoren is evenmin willekeurig. Voor gelijkstroomtractie zul je bijna altijd serie-motoren aantreffen, omdat een seriemotor een sterk aanloopkoppel heeft en een gunstige toerenregeling. Het nadeel van de seriemotor, dat hij bij uitvallen van de belasting „op hol" slaat vervalt bij tractie, daar de belasting steeds aanwezig is in de vorm van de trein of tram.

De stadstrams.

De stadstrams rijden, zoals gezegd, op ongeveer 500 tot 650 V gelijkstroom. Zij hebben meestal twee seriemotoren. De snelheidsregeling geschiedt door middel van weerstanden, soms ook door serie- en parallelschakeling van de motoren. De regeling is mogelijk met behulp van een schakelwals, die vaak dubbel is uitgevoerd, zodat met de motorwagens in beide richtingen kan worden gereden.

De stroomafneming geschiedt met een schuinstaande beugel, die onder de draad kan *glijden* of voorzien is van een wieltje (snaarschijf) dat tegen de draad wordt gedrukt. Men spreekt dan van een trolley. Een dergelijke trolley heeft bezwaren, b.v. het gemakkelijk ontsporen bij wissels, dat vooral in smalle straten een ontzettende ravage kan veroorzaken. Hoewel dit wel tot de uitzonderingen hoort heeft men van deze trolleys afgezien en past men nu meestal glijdende beugels toe.

Bij de trolleybussen ligt de zaak in zoverre anders, dat men geen gebruik kan maken van de rails als tweede geleider, waardoor twee draden noodzakelijk worden. Glijdende stroomafnemers kunnen hierbij niet gebruikt worden, daar dit niet zou gaan door het gevaar voor kortsluitingen tussen beide draden. Daarom zijn de bussen toch weer van trolleys voorzien.

Bij moderne trams ziet men vaak pantograaf-stroomafnemers.

of liever twee wieltjes, die echter naast elkaar staan. Het stroomloze stuk kan b.v. beperkt blijven tot een lengte van 30 tot 40 cm. Deze lengte is geen bezwaar, maar moet een hele motorwagen passeren, dan wordt de lengte van het stroomloze traject te lang.

In fig. 102 is een voorbeeld van een wissel getekend, dat de genoemde bezwaren mist. De lengte van het traject waarop men gebonden is aan „geen stroom" of „wel stroom" is hier teruggebracht tot enkele tientallen cm, doordat gebruik wordt gemaakt van hulpdraden of -staven, die naast de rijdraad zijn opgehangen. De wissel wordt hierbij omgelegd wanneer de tram onder de contactdraden rijdt en daarbij tegelijkertijd stroom afneemt. De wagenvoerder moet dus kijken hoe de wissel ligt. Er zijn twee contacten naast de rijdraad opgehangen, die door de stroomafnemer worden geraakt. De contacten c_1 en c_2 zijn niet even lang. Noemen wij de twee mogelijkheden R (rechtuit) en A (afbuigend) dan zal bij dit wisselsysteem voor R de stroom moeten worden uitgeschakeld, terwijl voor A de stroom juist moet worden ingeschakeld. Alleen wanneer stroom wordt afgenomen zal een stroom gaan van de rijdraad over de contacten 1 en 2 door spoel S_3 en het contact c_2 door de wagen naar de rails. De wagen neemt nl. stroom af van elk punt, dat onder spanning staat, dus niet alleen van de rijdraad, die zich ook ter plaatse van de contacten c bevindt. De omschakelaar O wordt dus omgelegd, waardoor de contacten 1 en 2 worden verbroken en ook de con-

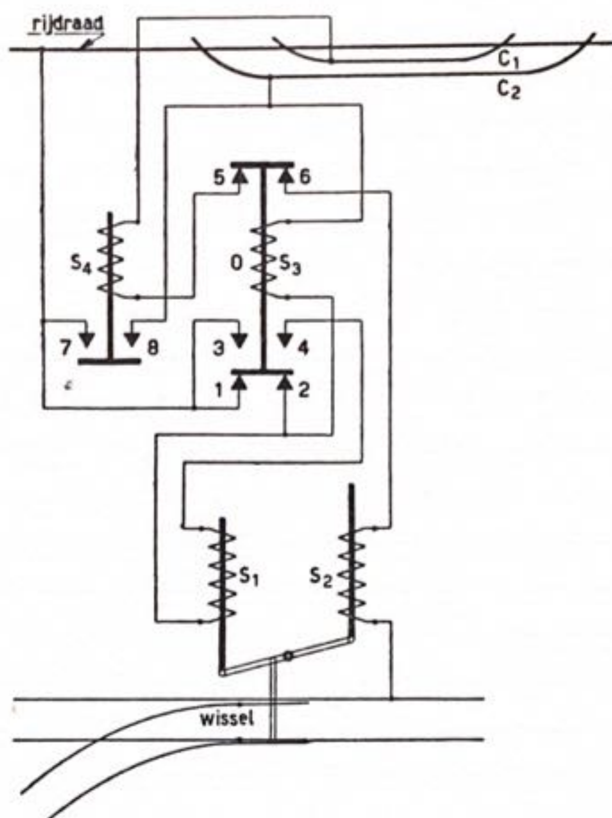


Fig. 102

singen komen zoveel trams per uur langs, dat het bezwaarlijk zou zijn als steeds de bestuurder uit de tram moest stappen om de wissel met een koevoet om te leggen. Behalve het oponthoud kan het stoppen van de tram het verkeer belemmeren, daar een wissel in de regel op een kruispunt van straten zit en juist daar in vele gevallen het verkeer niet mag worden opgehouden. De halte is in vele gevallen al daarom een eind verder of daarvoor geplaatst.

Het is echter mogelijk de wissel met een electromagneet om te leggen, waarbij de magneet met behulp van een contact wordt aangesloten, dat gemonteerd is naast de rijdraad en ook aan de rijdraad is opgehangen. Een eenvoudig middel om een wissel electrisch om te zetten is in fig. 101 getekend. In de bovenleiding bevindt zich een stroomloos stuk, d.w.z. een stuk, dat van de rest van het bovenleidingnet geïsoleerd is. Passeert de tram onder dit stuk, dan kan de tram wel of geen stroom trekken. Doet zij het niet, dan zal de wikkeling van de electromagneet niet worden bekrachtigd en de wissel blijft in een stand staan. De wagen van de tram moet dan zorgen zoveel vaart te hebben, dat hij over de wissel komt en pas weer stroom inschakelt na het passeren van het stroomloze stuk in de bovenleiding.

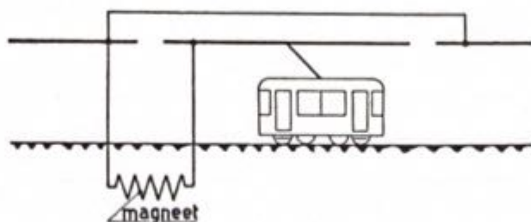


Fig. 101

Trekt daarentegen de tram wèl stroom tijdens het passeren van het geïsoleerde stuk bovenleiding, dan zal deze stroom worden getrokken door de spoel van de wisselmagneet en de wissel wordt omgezet. De tram moet nu stroom blijven trekken totdat hij de wissel geheel is gepasseerd. Nadat de stroomdoorgang door de spoel geëindigd is valt de wissel weer in de oorspronkelijke stand terug.

Dit systeem heeft vele bezwaren, zoals b.v. het niet tijdig vaart kunnen krijgen om het stroomloze stuk met uitgeschakelde motoren te passeren. Dit systeem wordt wèl gebruikt in Arnhem, maar dan onder andere omstandigheden! Daar gaat het erom een wissel te maken voor de wieltjes van de trolleys van de bussen. Deze wissels werken inderdaad op de bovenbeschreven manier, maar hier is het stroomloze stuk veel kleiner, omdat het gaat om slechts één wiel,

punt kan glijden en dat het practisch niet voorkomt, dat een draad loslaat en op de grond terechtkomt. Dit zou ernstige ongelukken tot gevolg kunnen hebben, daar in een stad heel vaak mensen onder de draden staan (voetgangers en fietsers) die het slachtoffer zouden worden bij aanraking van de hoge spanning.

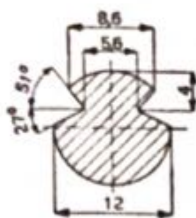


Fig. 99

De draad heeft dan ook een doorsnede als in fig. 99. Het trekken van dit soort draad is duurder dan van rond draad.

Bij glijdende stroomafnemers is het vrij gemakkelijk de draden zo te spannen, dat practisch zonder stroomonderbreking over de wissel kan worden gereden. In fig. 100 zie je schematisch een voorbeeld voor een enkelvoudige wissel. Wanneer je je ogen in de stad goed de kost geeft zul je de verschillende ophangmethoden al gauw gaan begrijpen. In fig. 100b is nog aangegeven waarom men de draad opzettelijk niet boven het midden van de baan laat lopen (bij rechte baanstukken) : opdat de draad regelmatig de verschillende punten van de stroomafnemer zal afsluiten en niet één bepaald punt in het midden, waardoor de stroomafnemer veel vlugger zou moeten worden vernieuwd.

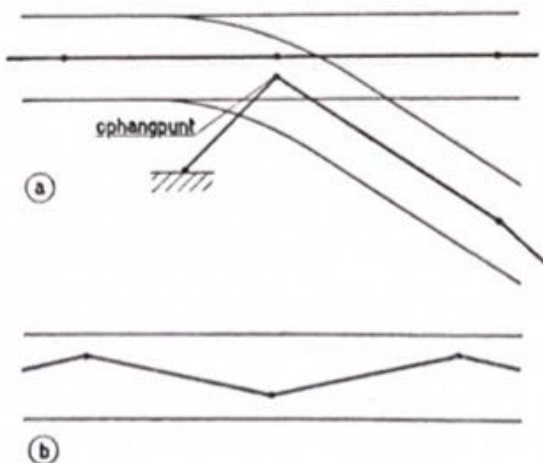


Fig. 100

Evenals bij de spoorwegen maakt men de stroomafnemer, althans het gedeelte dat tegen de rijdraad moet glijden, van zachter materiaal dan koper, waarvan de rijdraad is gemaakt. Het is nl. veel goedkoper van tijd tot tijd nieuwe stroomafnemers te plaatsen dan op een goed ogenblik te ontdekken, dat een hele nieuwe rijdraad moet worden aangebracht.

Hulpschakelingen bij stadstrams.

De electriciteit wordt bij trams vaak gebruikt voor hulpapparaten. Een voorbeeld daarvan is de electrische wissel. Op sommige split-

die zij leveren afnemen (het toerental neemt af) en de stroom door de ingeschakelde weerstand eveneens. Daarom moet men (met de schakelwals) weer wat weerstand afschakelen, zodat die op de draaiende motoren afneemt. Tenslotte kan men zelfs de motoren geheel kortsluiten, doch dat mag natuurlijk niet wanneer zij te snel draaien, daar dan door de motoren een te grote stroom zou vloeien.

Het electrisch remmen heeft het bezwaar, dat alleen een remkracht aanwezig is zolang de wagen rijdt. Bij stilstand zullen de motoren niet als dynamo kunnen werken en is er geen remkracht. Daarom is een handrem onmisbaar, daar anders (b.v. op een helling) de wagen nooit geheel tot stilstand te brengen zou zijn.

Een tweede manier van remmen is het remmen met recuperatie van de electrische energie. De motoren werken als dynamo. Het is natuurlijk jammer de aanwezige hoeveelheid energie in weerstanden weg te gooien. Daarom kan men de motoren als dynamo op het voedingsnet weer aansluiten, waardoor de tram weer energie in het net terugstuurt. In Nederland zou de hoeveelheid energie niet voldoende zijn om een dure en ingewikkelde schakeling van de schakelwals te rechtvaardigen. In het buitenland kan het echter voorkomen, dat een tram (of trein) een flinke tijd lang een helling moet afrijden en daarbij veel energie in het net kan terugsturen gedurende de tijd, dat hij moet afremmen om te voorkomen, dat de snelheid te groot wordt. Daar is het dus wel de moeite waard een ingewikkelde schakelwals toe te passen. Bovendien zouden de remweerstanden weer zwaarder moeten worden uitgevoerd als men op weerstanden zou willen remmen, daar zij, door het langere gebruik, warmer zouden worden.

Naast de schakelwals is meestal nog een kleine wals aangebracht met drie standen. De middelste stand maakt het mogelijk motoren geheel uit te schakelen. De beide andere standen dienen voor de twee rijrichtingen. Op deze manier is een bestuurder in staat een tram een eindje terug te laten rijden, zonder naar de andere kant van de wagen te moeten overlopen, b.v. wanneer hij een wissel verkeerd oprijdt.

Voor de verlichting van trams past men meestal serieschakeling van de lampen toe, omdat gloeilampen een kleinere spanning hebben dan de rijdraadspanning. Over het algemeen gebruikt men

ving mogelijk is. De motoren zitten merendeels in ijzeren huizen afgesloten, daar zij veel te lijden hebben van stof en water. Met behulp van de schakelwals kunnen een of meer weerstanden in serie worden geschakeld, waardoor de snelheid afneemt (de spanning heeft invloed op het toerental). Dit zou met wisselstroommotoren niet mogelijk zijn. Teneinde geen onnodig verlies in weerstanden te krijgen en om die weerstanden ook zo klein mogelijk te kunnen maken schakelt men, wanneer er meer dan één motor is de motoren voor kleine snelheden in serie met elkaar en voor grotere snelheden parallel. In sommige gevallen heeft een motorwagen zelfs 4 motoren, die dan weer in serie, twee aan twee parallel en in serie of alle vier parallel geschakeld kunnen worden.

Het spreekt vanzelf, dat het serieschakelen en het voorschakelen van weerstanden niet alleen voor de snelheidsregeling nodig is, maar ook voor het inschakelen van de motoren, teneinde de inschakelstromen te beperken. Schakelt een bestuurder dan ook eens te vlug om, dan zal de tegen-e.m.k. van de motor nog niet groot genoeg zijn en de opgenomen stroom te groot. De maximaal-automaat valt dan uit en kan na terugschakelen van de schakelwals weer ingeschakeld worden.

Er zijn twee manieren van remmen. Men kan eenvoudig met een handrem de snelheid terugvoeren, doch een betere methode is echter het electrisch remmen, omdat dit minder onderhoud vergt. De handremmen moeten nl. doorlopend bijgesteld worden en van tijd tot tijd moeten nieuwe remblokken worden geplaatst, terwijl men bij het electrisch remmen van de electromotoren gebruik maakt.

Het electrisch remmen is op twee manieren mogelijk. In Nederland past men alleen het remmen op weerstanden toe. De motor die op gang is kan als dynamo worden beschouwd. Is de motor electrisch geheel losgeschakeld van het net, dan zal de wagen op zijn eigen massa doorrijden, totdat de vaart door de railwrijving geheel is afgenomen. Wil men remmen, dan kan men op de motoren (dynamo's) weerstanden schakelen. De draaiende motoren worden dan afgeremd en de wagen vermindert vaart. Dit remmen kan in sterkte weer geregeld worden door meer of minder weerstand in te schakelen. Men begint met veel weerstand. Naarmate de motoren langzamer draaien (door het afremmen) zal echter de spanning,

tacten 5 en 6. De contacten 3 en 4 worden gesloten. Zoals je nu gemakkelijk kunt nazien zal magneet K_1 worden bekrachtigd en de wissel voor de richting A worden omgelegd.

De lengte van contact c_2 is groter dan van contact c_1, zodat de wissel al in de stand A staat voordat de stroomafnemer contact c_1 heeft bereikt. Bereikt de stroomafnemer dit contact, dan zal er in dit geval niets gebeuren, want de contacten 5 en 6 van de omschakelaar O zijn verbroken, zodat geen stroom door S_4 kan gaan. Nadat de stroomafnemer echter beide contacten heeft verlaten valt de omschakelaar O weer in de oorspronkelijke stand terug. De wissel blijft echter in de stand A.

Wanneer een tram de richting R op moet, dan zal zij met uitgeschakelde motoren het contact moeten passeren. Wanneer de stroomafnemer contact c_2 raakt gebeurt er niets, omdat er geen stroom door de bekrachtigingsspoel van de omschakelaar kan vloeien. Zodra echter ook contact c_1 wordt geraakt zal S_4 worden bekrachtigd, alsmede S_2, waardoor de wissel in de stand R wordt getrokken. Het bekrachtigen van S_4 heeft tot doel de schakelaar te sluiten (contacten 7 en 8) waardoor de omschakelaar O kortgesloten is en dus niet kan worden omgezet als de bestuurder de motoren eens te vroeg mocht inschakelen voor het verlaten van de contacten c.

In vele gevallen gebruikt men bij de trams signaallampjes voor het aantonen of op een bepaald baanvak al of geen tram is. Dit zal b.v. het geval zijn wanneer een gedeelte van de trambaan gemeenschappelijk moet worden gebruikt voor beide richtingen, terwijl het stuk zo lang is, dat je aan het begin het andere einde niet kunt zien. Om te voorkomen, dat twee trams elkaar ontmoeten, waardoor er een terug zou moeten rijden worden signaallampjes aangebracht aan beide einden. Rijdt een tram het gemeenschappelijke baanvak op, dan zal het baanvak bij groen licht vrij zijn, terwijl hij bij rood licht weet, dat hij moet wachten, omdat het baanvak is bezet. Zodra hij zelf het baanvak oprijdt (bij groen licht) zal aan het andere einde van het baanvak het licht op rood overgaan.

De motoren bij trams worden meestal aangebracht dicht bij de assen, zodat met tandwieloverbrenging een gemakkelijke aandrij-

Voor het verkrijgen van de stuurspanning van 100 V moet men gebruik maken van een motor-generator (gelijkstroom kan niet worden getransformeerd), hetgeen eveneens het geval is voor de verlichting, die ongeveer 65 V spanning nodig heeft. Deze verlichting blijft branden wanneer de spanning van de rijdraad afvalt, omdat onder de wagens van de trein accumulatorenbatterijen zijn aangebracht. In geval van een ongeluk heeft men dus altijd nog licht. De accumulator dient als bufferbatterij, zodat de motorgenerator voor de verlichting steeds draait. Een ingenieus apparaat zorgt ervoor dat de verlichting overgeschakeld wordt op de batterij, wanneer de motorgenerator beneden een zeker toerental terugloopt. Zodra de spanning op de stroomafnemers komt gaat de motorgenerator weer draaien, en zodra de spanning voldoende is schakelt de automaat de verlichting weer op de generator.

Voor de verwarming van de treinen maakt men gebruik van electrische energie. Daar het hier gaat om grotere energie wil men niet op een lagere spanning overgaan, daar veel verlies zou optreden in de daartoe noodzakelijke motorgenerator, die overigens weer extra gewicht en kosten zou meebrengen. Daarom wordt de verwarming met 1500 V gevoed, waarvoor in de oudere wagens onder de zitbanken verwarmingselementen zijn geplaatst, die in groepen in serie op de rijspanning zijn aangesloten. De verwarmingselementen zijn zodanig afgeschermd, dat aanraking met de hoge spanning vrijwel niet mogelijk is. Dit is natuurlijk eveneens het geval met de leidingen die voor de voeding ervan dienen.

In de bestuurderscabine vind je in de eerste plaats de handle voor het in- en uitschakelen van de volgordewals. Bovendien zie je nog een kleine handle voor het omkeren van de richting der motoren. De hoofdhandle is de zgn. dodemanshandle, die de trein doet stoppen, wanneer zij niet neergedrukt wordt. Tijdens het rijden moet de wagenvoerder dus doorlopend de handle neergedrukt houden, hetgeen de garantie geeft, dat een trein nooit kan wegrijden of blijven rijden, wanneer de wagenvoerder niet aanwezig is of b.v. onwel wordt. Opdat hij echter de handle even los kan laten kan hij het dodemanscontact ook sluiten met behulp van een pedaal, dat voorzien is van een kogel, waarvan zijn voet af zou glijden, wanneer hij onwel werd.

gevoerd. Deze kabel voert dus de rijstroom naar de motoren, waarbij echter eerst de rijschakelaars moeten worden gepasseerd, die in zgn. rijschakelkasten, aan de onderzijde van de wagens (opzij) zijn gemonteerd. Bij de stroomlijntreinen kun je ze niet zien, daar zij afgedekt worden door de ronde grijze dekplaten, die het geheel een beter aanzien geven.

Voor elke schakelstand is een rijschakelaar aanwezig. Deze schakelt de motoren dan in de gewenste schakeling, hetzij in serie of parallel, hetzij mèt of zonder voorschakelweerstanden, hetzij met of zonder verzwakt veld. Het in- en uitschakelen van de rijschakelaars, die bediend worden met 100 V (in de nieuwe treinen) geschiedt vanuit de bestuurderscabine. Bij sommige treinen bevindt zich nl. daar de schakelwals, die niet, zoals bij de trein, direct met de hand door de wagenvoerder wordt bediend. Deze schakelwals wordt nl. met behulp van een motor gedraaid, hetgeen tevens de mogelijkheid opent de schakelwals automatisch te laten draaien. De wals wordt daarom volgordewals genoemd, omdat zij de juiste volgorde van het inschakelen van de rijschakelaars bepaalt. De volgordewals is niet altijd in de bestuurderscabine geplaatst maar ook wel eens onder de wagen.

De wagenvoerder heeft nu een handle, die hij in een bepaalde stand kan plaatsen, afhankelijk van de snelheid, die gereden moet worden. Wenst hij zo vlug mogelijk de grootste snelheid te gaan rijden, dan kan hij de handle direct in de hoogste stand plaatsen. De motoren worden toch pas ingeschakeld wanneer de volgordewals draait en deze doet dat niet sneller dan toelaatbaar is in verband met de stroomsterkte.

Door de hele trein loopt nu een aantal draden, die voor het in- en uitschakelen van de rijschakelaars dienen. Meestal zijn het 21 draden, die samen de stuurstroomleidingen vormen. Neem je b.v. een stroomlijntreinstel van 5 wagens, dan heeft de eerste, derde en vijfde wagen één stroomafnemer en motoren. De motoren worden gevoed over de respectievelijke stroomafnemers. Er zijn dan drie stellen rijschakelaars in de motorwagens. Deze kunnen echter door middel van slechts één volgordewals bediend worden over de stuurstroomleidingen. De 1500 V rijspanning behoeft dan niet van de ene wagen naar de andere te worden overgebracht.

bajonetfittingen tegen het lostrillen van de lampen. In trams heeft men geen accumulatorbatterij als buffer voor de verlichting, zodat de lampen uitgaan, wanneer de stroomafnemer even de rijdraad loslaat, b.v. bij het passeren van kruispunten en wissels.

Electrische treinen.

Bij de electrische treinen is de electrische installatie uiteraard veel ingewikkelder dan bij de tram. In de eerste plaats is het aantal motoren groter, waarvan men het vermogen opzettelijk over een trein verdeelt, omdat dat vele voordelen heeft. Daardoor kan men o.a. een kortere trein maken, terwijl toch eenzelfde hoeveelheid vermogen wordt meegenomen. Zo kan men b.v. bepalen, dat een motorwagen voldoende vermogen heeft voor zichzelf plus een of twee aanhangwagens. Wil men dan een lange trein maken, dan kan men enige aanhangwagens en een aantal motorwagens bijkoppelen. In de tweede plaats is het uit een oogpunt van bedrijfszekerheid beter het vermogen te verdelen over meer motoren dan alles aan te drijven met een of twee motoren. Een trein kan zodoende altijd verder, ook al valt een motorpaar uit.

Doordat er meer motoren zijn is de schakeling ingewikkelder, daar zij alle vanuit één punt moeten worden bediend. Bovendien is het bezwaarlijk, mede in verband met de spanning (1500 V), de hoofdstroom vanuit het besturingspunt naar alle motoren te leiden. Daarom werkt men met de zgn. stuurstroomschakelingen, waarbij de besturing geschiedt met behulp van tussenschakelaars, die weer electrisch kunnen worden bediend, maar dan met een lagere spanning. Als stuurspanning gebruikte men bij de oudere treinen 36 V, tegenwoordig bij de stroomlijntreinen ongeveer 100 V.

De 1500 V rijspanning komt nu alleen nog voor boven en onder de wagens. De toevoering van de hoogspanningsleidingen geschiedt tussen de wagens. Op de wagens zijn stroomafnemers gemonteerd. Deze zijn van het pantograaf-type en aanmerkelijk steviger uitgevoerd dan bij trams, vanwege de veel grotere snelheden.

Deze stroomafnemers staan op porseleinen isolatoren. Vanaf deze stroomafnemers lopen leidingen op het dak van de wagen. Deze leidingen zijn eveneens op isolatoren gemonteerd en gaan op een goed ogenblik over in een kabel, die in een buis naar beneden wordt

eigen kabel gevoed. Deze bouw is bedoeld voor het localiseren van storingen. Zodra nl. in een sectie een storing optreedt kan men de sectie afschakelen van de rest van het net met behulp van de sectieschakelaar. Ook de voedingskabel kan men uitschakelen. Reparatie aan de bovenleiding is dan mogelijk, zonder dat de rest van het bedrijf wordt gestoord.

Op emplacementen, waar vele draadstukken onderverdeeld zijn heeft men eveneens schakelaars, die de stukken met elkaar verbinden (koppelschakelaars), zodat bij een storing slechts een klein deel van het emplacement buiten werking behoeft te worden gesteld.

Als rijdraad gebruikt men weer draad met een bijzondere doorsnede, die het mogelijk maakt de draad stevig vast te maken aan de ophangpunten, terwijl de stroomafnemers toch volkomen vrij daaronder door kunnen glijden.

Doordat de stroomsterkten bij treinen veel groter zijn dan bij trams, heeft men altijd twee draden naast elkaar gespannen, terwijl de stroomafnemers twee staven naast elkaar bezitten. Daar de staven van de stroomafnemers loodrecht op de richting van de rijdraad staan zal men de draad in het algemeen op vier punten raken. Het blijkt alleen op die wijze mogelijk deze grote stroomsterkten zonder teveel vonken af te kunnen nemen. De rijdraden hebben een doorsnede van ongeveer 100 mm^2, zodat bij 1200 A door de draden de stroomdichtheid ongeveer 6 A/mm^2 bedraagt. Evenwel heb je nog de draagkabels, die een doorsnede bezitten overeenkomende met 30 mm^2 koper. Bovendien zijn er nog een of meer versterkingsleidingen van koper, die elk een koperdoorsnede hebben van 120 mm^2.

De ophanging geschiedt, zoals reeds werd opgemerkt door middel van een ophangdraad, zodat de eigenlijke rijdraad zuiver horizontaal hangt. Bovendien stelt men eisen aan de zijdelingse plaats van de rijdraad. In de eerste plaats moet de draad de stroomafnemers regelmatig afslijten, zodat hij boven de rijbaan heen en weer moet gaan en niet steeds in het midden boven de baan hangen. Dit is weergegeven in fig. 103 onderaan. De draad wordt op zijn plaats gehouden doordat aan elke paal een staaf is, die hem op een bepaalde afstand van de paal houdt, zoals uit de figuur rechts te zien is.

tegen overspanningen, b.v. door het inslaan van de bliksem in de bovenleiding. Vervolgens zie je duidelijk dat de rijstroom door een spoel van enkele windingen gaat, een zgn. Peterson-spoel, die je ook aan het einde van hoogspanningslijnen zult aantreffen. Deze spoel dempt eventuele lopende golven, tengevolge van schakelstoten of blikseminslag in de bovenleiding die overspanningen zouden kunnen veroorzaken.

Een trein heeft ook enige maximaalrelais, die uitschakelen, wanneer de opgenomen stroom om welke reden ook te hoog oploopt. Deze relais kunnen nadat de storing is verdwenen weer worden ingeschakeld.

Het begrenzingsrelais dient om te zorgen, dat alleen op de volgende trap geschakeld kan worden wanneer de stroom zodanig teruggelopen is, dat de motoren een voldoend hoog toerental bezitten.

Bij de stroomlijntreinen bestaat de mogelijkheid verscheidene treinstellen achter elkaar te koppelen. Hierbij kunnen het koppelen en het ontkoppelen geheel automatisch geschieden. Bij het koppelen worden de twee treinen eenvoudig tegen elkaar gereden, waarbij de koppelhaken vanzelf in elkaar grijpen. Maar ook de luchtleidingen moeten met elkaar verbonden en tenslotte de stuurstroomleidingen doorverbonden worden. Dit alles geschiedt door de automatische Scharfenberg-koppeling. Deze bevat behalve de koppelhaak een aantal contacten voor de stuurstroomleidingen. Doordat het mogelijk moet zijn de treinen in elke stand met elkaar te koppelen moeten er tweemaal zoveel contacten zijn als er verschillende stuurstroomleidingen zijn. Er zijn dan ook 42 contacten. De persluchtleidingen eindigen eveneens in de koppelhaak en worden zodanig tegen elkaar gedrukt, dat een goede verbinding tot stand komt. Het ontkoppelen geschiedt door vanuit de bestuurderscabine een pedaal neer te drukken. Wanneer de koppeling niet gebruikt wordt wordt zij afgedekt tegen stof met een (rood geverfde) afdekplaat.

Het electrisch net is verdeeld in secties, die door middel van sectieschakelaars met elkaar zijn verbonden. Elke sectie wordt door een

De dodemanshandle werkt met behulp van een paar contacten, die (eveneens met de 100 V stuurstroom) de hoofdstroom kunnen uitschakelen doordat de volgordewals meteen naar de nulstand terugdraait.

In de bestuurderscabine zijn enige meetinstrumenten geplaatst. In de eerste plaats is er een voltmeter, die in staat stelt de rijspanning (ca. 1500 V) te controleren. Dan is er een ampèremeter om de opgenomen stroomsterkte te controleren. Deze bedraagt tussen haakjes ongeveer 800 A bij het inschakelen en ongeveer 200 A tijdens de normale rit! Dan heeft de bestuurderscabine nog een voltmeter voor het controleren van de stuurspanning (ca 100 V) hetgeen belangrijk is, daar alleen door de stuurspanning de trein bestuurd kan worden.

Rechts van de bestuurder is nog een snelheidsmeter en een luchtdrukmeter. Bij electrische treinen wordt nl. altijd pneumatisch geremd. Het zgn. Westinghouse-systeem wordt nog algemeen toegepast, d.w.z. dat de remblokken bij afwezigheid van lucht in de remleiding aandrukken en de trein dus stopt. Alleen bij het persen van lucht in de remleiding tot enkele atmosferen zullen de blokken loslaten. Dit betekent dus ook, dat wanneer om welke reden ook een treinkoppeling breekt de trein stopt, omdat de slangen van de remleiding tussen de wagens scheuren en de lucht uit de remleiding weglekt.

Behalve de druk in de remleiding kan de wagenvoerder ook de druk in de treinleiding controleren, dat is een leiding, waarin lucht doorlopend op een minimumdruk wordt gehouden om weer in de remleiding te worden overgebracht voor het losmaken van de remmen.

De wagenvoerder heeft ook nog de beschikking over een aantal drukknoppen. Eén daarvan dient voor het op- en neerlaten van de stroomafnemers. Het bewegen van de stroomafnemers geschiedt met perslucht uit het hoofdreservoir, dat ook perslucht voor de remmen levert. Eveneens met perslucht werkt de hoorn, die de wagenvoerder met een pedaal kan bedienen.

Van de vele hulptoestellen die in een trein zitten zullen wij slechts enkele noemen. In de eerste plaats zie je direct bij de stroomafnemer een hoornbliksemafleider, die de apparatuur in de trein beveiligt

dan de hoofdautomaat uit, dan zal de spanning automatisch weer ingeschakeld worden door een wederinschakelapparaat. Dit gaat zo driemaal door, waarna het wederinschakelapparaat wordt geblokkeerd en de spanning niet meer inkomt. Tevens wordt dan een alarminrichting in werking gesteld, waardoor het personeel op het blijvend uitvallen van de spanning wordt attent gemaakt.

De stroomafnemer gaat daar over op een volgende rijdraad. Dat de draad door middel van gewichten zgn. *nagespannen* moet worden is alleen daarom al nodig omdat bij temperatuursverandering de draad van lengte verandert. De gewichten met bijbehorende inrichting worden dan ook naspaninrichtingen genoemd.

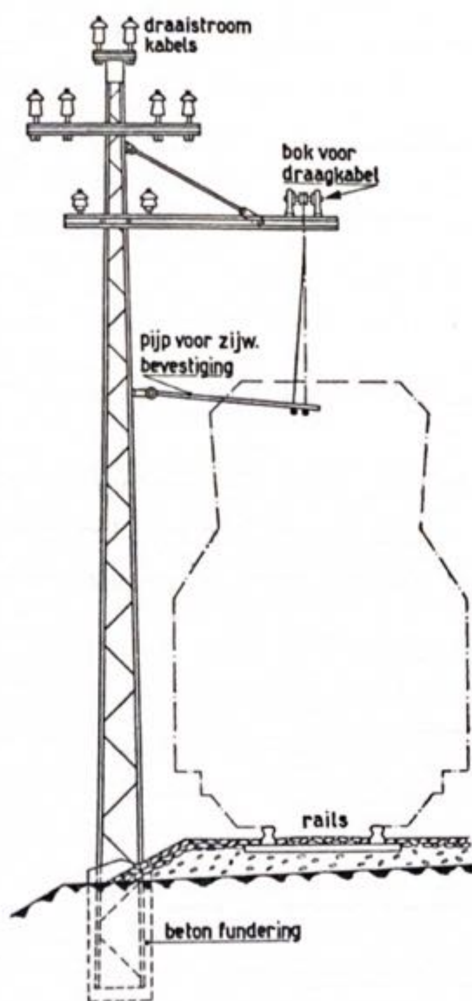


Fig. 105

Soms zie je dat de bovenleiding opgehangen is aan palen, dan weer is de leiding opgehangen aan portalen. Dit hangt af van de stevigheid van de grond. Wanneer je met een zachte grond te maken hebt zul je portalen moeten toepassen.

Zoals we hebben gezien moet langs de baan een aantal onderstations worden gebouwd. In deze stations wordt de electrische energie aangevoerd in de vorm van draaistroom onder een spanning van b.v. 50 kV. De spanning wordt omlaaggetransformeerd in een of twee trappen tot 1500 V draaistroom en dan met behulp van kwikdampgelijkrichters tot 1500 V gelijkstroom gelijkgericht. Vroeger gebruikte men daarvoor motorgeneratoren, doch het is gebleken dat kwikdampgelijkrichters een beter rendement hebben, de onderhoudskosten medegerekend.

Vanaf de onderstations wordt de rijstroom over verscheidene kabels naar de verschillende secties van het bovennet gevoerd. De onderstations zijn voor een groot deel geautomatiseerd. Zo is voorzien in het uitvallen van de spanning door *kortstondige* overbelasting, wanneer b.v. verscheidene treinen op hetzelfde ogenblik inschakelen, waardoor een zeer grote stroom wordt opgenomen. Valt

Zowel rijdraad als ophangdraad is natuurlijk geïsoleerd aan de palen bevestigd. Ook de staaf, die de draad op afstand van de paal

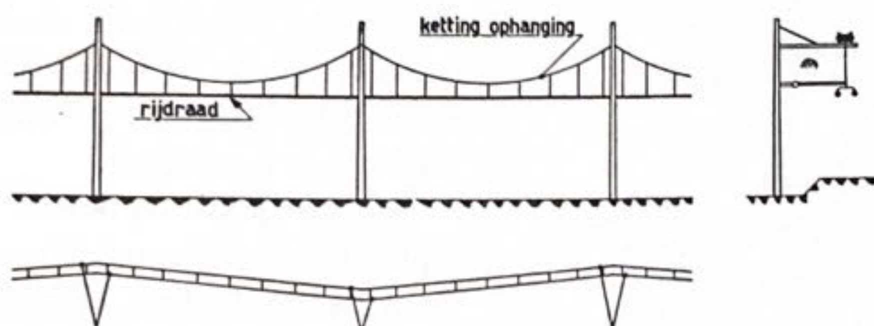


Fig. 103

houdt, is dicht bij de bevestiging aan de paal van een isolator voorzien.

Behalve deze zig-zag-ophanging bestaat nog de symmetrische ophanging, waarbij de bovenleiding altijd boven het midden van de baan hangt, maar waarbij de twee draden meer of minder ver uit elkaar liggen (fig. 104).

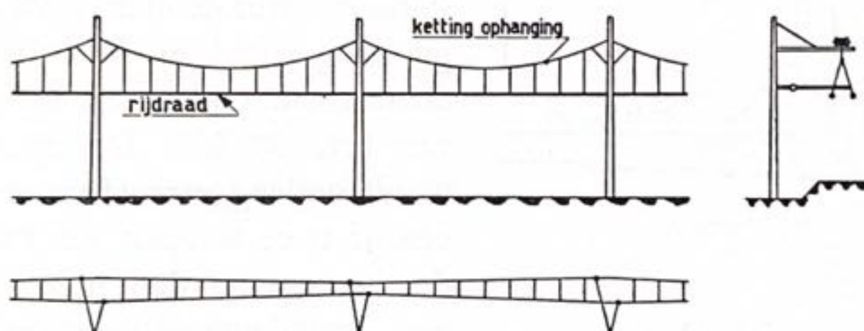


Fig. 104

In fig. 105 is nog een doorsnede door een helft van de baan getekend. Het gestippelde profiel stelt voor de minimale doorsnede, die de baan overal moet hebben.

Op de palen van de bovenleiding kunnen nog draaistroomkabels worden opgehangen voor het overbrengen van energie naar een volgend onderstation.

De rijdraden worden gespannen gehouden door middel van zware gewichten. Ongeveer om de 1500 meter komen deze gewichten voor.

hebben. Bij het einde van de lading, dus wanneer de cel zoveel energie bevat als het gezien haar capaciteit mogelijk is zal de spanning boven 2 volt stijgen tot ongeveer 2,75 V.

De capaciteit van een accucel drukt men uit in ampère-uren. Dit is het product van de stroom maal de tijd van ontladen. Stel, dat een accucel gedurende 10 uur een stroom van 10 A kan leveren, dan is haar capaciteit gelijk aan 100 Ah (ampère-uur). Men zou nu theoretisch ook 50 uur lang 2 A kunnen afnemen, of 2 uur lang 50 A. De capaciteit is echter wel afhankelijk van de afgenomen stroomsterkte, terwijl er altijd een maximumstroom is, die de cel kan verdragen. Kortstondige overbelasting is wel toegestaan, maar bij langdurige ontlading met een stroom groter dan de maximum toelaatbare kan men de cel vernielen en zal in elk geval de levensduur aanmerkelijk worden bekort. De levensduur is eigenlijk het aantal malen dat men de cel kan laden en weer geheel ontladen.

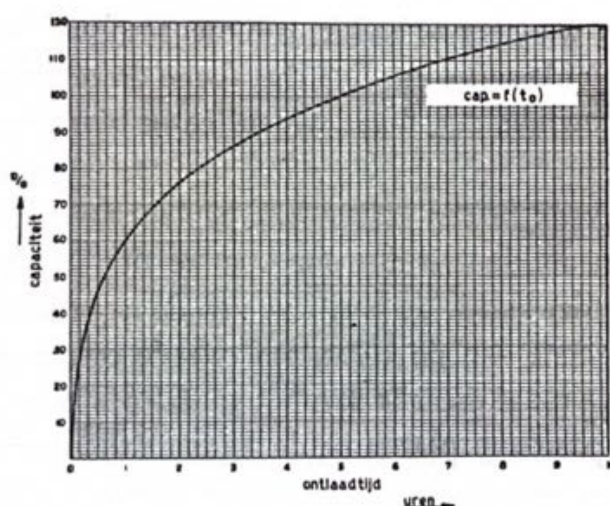


Fig. 106

In fig. 106 is een grafiek weergegeven, die laat zien hoe de capaciteit van een cel verandert wanneer men de ontlaadtijd (dus ook de stroom) verandert. Als normaal is genomen 100 %. Dat is bij ontladen in 5 uur. Een bepaalde cel zal dan b.v. een capaciteit hebben van 200 A, zodat de ontlaadstroom 40 A mag zijn. Indien we echter de geladen cel in één uur zouden willen ontladen zou de stroom geen 200 A worden. Uit de grafiek blijkt nl. dat de capaciteit gedaald is tot 60 % van de normale, d.w.z. dat deze in ons geval nog maar 120 Ah bedraagt. De afgenomen stroom mag dus 120 A zijn. Dit is echter misschien groter dan toelaatbaar is voor de cel, zodat het niet is gezegd, dat je dit werkelijk kunt doen.

Wel mag je een cel in een langere tijd ontladen dan de normale tijd van 5 uur. In dat geval zul je ook een grotere capaciteit vinden,

ten het geval is. Hij moet eerst geladen worden en kan na ontlading weer opgeladen worden. Een accucel levert een spanning van 2 volt, ongeacht zijn afmetingen. Deze laatste bepalen echter wel zijn capaciteit, d.w.z. de hoeveelheid energie, die je erin kunt verzamelen.

Bij de aanvang der lading heeft het zuur een bepaalde dichtheid. De platen van een geformeerde cel zijn bedekt met loodsulfaat, een verbinding van het lood met een deel van de moleculen van het zwavelzuur. Bij het laden wordt een chemische omzetting tot stand gebracht van het loodsulfaat in lood en de zuurrest van het zwavelzuur. Dit laatste geeft met het water zwavelzuur, zodat tijdens het laden de concentratie van het zwavelzuur stijgt, doordat er water omgezet wordt in zwavelzuur. De negatieve plaat van de cel blijkt aan het einde van de lading aan het oppervlak geheel uit lood te bestaan, terwijl de positieve plaat met lood-super-oxyde is bedekt. Vandaar dat aan het einde van de lading de positieve platen van een accu donkerbruin en de negatieve platen grijs van kleur zijn. Bij het begin van de lading, wanneer ze bedekt zijn met loodsulfaat zien beide platenstellen er donkergrijs uit. Die chemische omzetting is in werkelijkheid veel ingewikkelder, maar wij zullen er hier niet verder op ingaan.

Kleinere accucellen zijn vaak in een glazen bak geplaatst, zodat je de platen kunt zien. Aan de kleur is dus ongeveer te zien of de cel al of niet is geladen. Verder kun je de positieve van de negatieve platen onderscheiden, ten eerste aan de kleur, ten tweede ook aan het feit, dat er een negatieve plaat meer is dan het aantal positieve. Dit doet men om van de positieve platen beide zijden werkzaam te kunnen doen zijn.

Grotere accucellen zijn vaak in bakken van hout gemonteerd, dat natuurlijk de nodige bewerking heeft ondergaan om niet door het zuur te worden aangetast. Ook hardrubber en sommige kunststoffen, die op bakeliet lijken worden voor de bakken gebruikt.

De spanning zal tijdens het laden of ontladen van de cel steeds ongeveer 2 volt blijven, zodat het meten van de spanning geen aanwijzing kan geven omtrent de stand van de lading. Wel is het zo, dat bij het einde van de lading de spanning van 2 volt zal zakken tot ongeveer 1,85 V. Lagere spanning mag men niet toelaten en verder ontladen zou vernieling van de platen van de cel tot gevolg

HOOFDSTUK VII

Accumulatoren en gelijkrichters: Toepassingen van accumulatoren - eigenschappen van accumulatoren-batterijen - onderhoud van accumulatoren - ontlading en oplading van accumulatoren - gelijkrichters voor klein vermogen - gelijkrichters met buizen voor groot vermogen - gelijkrichters met metaalcellen.

Electrische energie kan een zeer voordelige vorm van energie zijn, maar er is één bezwaar : het is niet mogelijk de energie te bewaren; ze moet onmiddellijk bij de productie worden gebruikt. In feite is dit niet helemaal juist. Men kan wel degelijk electrische energie opzamelen met het doel deze later te gebruiken, maar dit is niet economisch in het groot te realiseren.

De accumulator stelt ons in staat electrische energie op te zamelen en men gebruikt dit toestel dan ook dáár waar men niet onmiddellijk met de centrale in verbinding kan staan. Dit is meestal het geval in mobiele installaties, zoals auto's, kleinere wagens en andere voertuigen. Er waren dan ook accumulatoren-trams gemaakt, die dus geen dure bovenleiding nodig hadden. Op de duur was het echter economisch niet verantwoord accu's voor tractie in het groot te gebruiken en is men op de bovenleiding overgegaan.

Accumulatoren leveren in auto's de energie voor ontsteking, verlichting en andere hulptoestellen en worden toegepast in de electrische wagentjes voor het vervoer van bagage op stations, in vliegtuigen, op schepen en duikboten, enz. Men heeft ook electrische fietsen gemaakt, die hun energie via accumulatoren ontvingen, maar ze maakten geen opgang en zijn weer van de wegen verdwenen. Voorts gebruikt men accu's soms wanneer men in korte tijd véél energie moet verbruiken, zodat het vermogen dus groot moet zijn. Voor het laden van de accu's is dan een veel kleiner vermogen voldoende, omdat men zonder bezwaar een lange laadtijd kan toelaten.

De meest gangbare accumulator bestaat uit een aantal loden platen, gemonteerd in een bak die gevuld is met een oplossing van zwavelzuur. De accu behoort tot de zgn. secundaire elementen, d.w.z. dat hij geen electriciteit uit zichzelf levert, zoals met zink-kool-elemen-

gebruikt worden in gelijkstroominstallaties. Men kan ze daar gebruiken voor het opvangen van de reeds eerder genoemde pieken in de belasting van de centrale. Dit kan een groot voordeel zijn, daar men in de nacht en in de uren van de dag met lage belasting de batterij rustig kan opladen. De energie wordt dan onttrokken aan de dynamo's, die dus niet met een zeer lage belasting hoeven te draaien. Bij de piekbelasting zal er dan een ogenblik komen, dat de dynamo's volbelast zijn. Bij nog hogere belasting schakelt men dan de batterij parallel, zodat ze haar energie weer kan afgeven. Hierdoor kan men met kleinere capaciteiten van de dynamo's werken, hetgeen een economisch voordeel is. Het is zelfs mogelijk de zaak zo uit te zoeken, dat de dynamo's steeds ongeveer volbelast werken, daar men nu vrij is voor een bepaald net de capaciteit van machines en batterij te kiezen. Daar hoe langer hoe minder gelijkstroomnetten voorkomen, heeft dit buffersysteem practisch geen waarde meer.

Accumulatorenbatterijen worden ook gebruikt in treinen voor de verlichting. Weliswaar heeft elke wagen een dynamo, die met een riem wordt aangedreven door de as van de wagen, maar men stelt als eis, dat het licht ook blijft branden tijdens stilstand van de trein. De dynamo laadt dan de batterij tijdens het rijden en geeft daarbij een groot deel van zijn vermogen aan de verlichting door. Bij stilstand zal de energie voor de verlichting uit de batterij moeten worden betrokken. In dit geval werkt de batterij ook als bufferbatterij. Speciale maatregelen moeten worden genomen, opdat de dynamo, bij stilstand, dus wanneer hij geen spanning levert, niet als motor gaat werken. Niet dat de trein daardoor in beweging zou kunnen komen (!) maar wel zou de belasting op de batterij minder aangename gevolgen voor deze kunnen hebben. Een zgn. tegenstroomautomaat zorgt ervoor, dat wanneer de stroomrichting omkeert, hetgeen al zou kunnen gebeuren, wanneer de dynamo (bij langzaam rijden van de trein) een lagere spanning opleverde dan de klemspanning van de batterij, de dynamo van de batterij wordt afgeschakeld. Zodra de spanning dan hoger is dan de klemspanning van de batterij schakelt de automaat de dynamo weer in.

In de telefonie speelt de accumulatorenbatterij een belangrijke rol, alleen omdat zij zuivere gelijkstroom levert. Deze stroom moet

Het bepalen van de stand van de lading geschiedt dus niet met een voltmeter, want die zal altijd 2 V aanwijzen, tenzij de cel *geheel* is opgeladen of ontladen, doch met een zgn. zuurweger, een instrument, waarmede men de dichtheid van het zuur kan bepalen. Dit instrument is soms geijkt in soortelijk gewicht, soms in graden Baumé. De dichtheid van het gebruikte zuur moet je altijd nemen, zoals de fabrikant dat opgeeft. Dit is van het grootste belang voor het behoud van de cellen.

Door serieschakeling van cellen, waarbij natuurlijk steeds de + pool van een cel verbonden wordt met de — pool van de volgende kan men de spanning verhogen. Men gebruikt daarvoor dan gelijksoortige cellen, zodat de capaciteit van de aldus ontstane *batterij* even groot is als die van één cel. Door parallelschakeling kan men daarentegen bij gelijkblijvende spanning de capaciteit verhogen. Het spreekt vanzelf dat de capaciteit van een batterij parallelgeschakelde cellen gelijk is aan de som van hun afzonderlijke capaciteiten.

Bij de serieschakeling doet zich bij hogere spanningen nog een eigenaardigheid voor. Bij geheel ontladen cellen zal de spanning per cel 1,83 V bedragen. Wil je nu een batterij samenstellen, die 110 V levert, dan moet je dus aan het einde van de lading $\frac{110}{1{,}83} =$ 60 cellen nemen. Tijdens de ontlading echter levert elke cel 2 V, zodat de spanning van de batterij 120 V zou worden. Eist men dat de spanning niet hoger wordt dan 110 V dan zullen een paar cellen moeten worden afgeschakeld. Daarentegen zal aan het einde van de lading de spanning per cel tot ongeveer 2,75 V stijgen, waardoor het aantal cellen, direct na het laden dus wanneer je onmiddellijk begint te ontladen, kleiner moet zijn dan het normale aantal. Daarom zijn bij grotere batterijen enkele cellen zodanig uitgevoerd, dat zij afgetakt kunnen worden; men noemt ze schakelcellen. De bijbehorende schakelaar, die in verband met de gangbare hoge stroomsterkten zwaar moet zijn uitgevoerd, heet cellenschakelaar. Wil men tijdens het ontladen de mogelijkheid hebben de batterij bij te laden, dan moet men zelfs twee cellenschakelaars hebben, hetgeen de zaak nogal duur maakt.

Daar accu's gelijkstroom leveren, kunnen zij als bufferbatterij

b.v. in 7 uur 110 % of in ons geval 220 Ah, in plaats van 200. Je moet wel begrijpen, dat je die energie er eerst in moet brengen! De capaciteit wil dus niet zeggen: de hoeveelheid energie, die de cel levert, maar: de hoeveelheid energie die je er in kunt opbergen. Capaciteiten worden door de verschillende fabrieken voor verschillende tijden gegeven. Heel vaak neemt men als normaal een ontlaadtijd van 10 uur, maar bij accucellen, die voor het normale bedrijf, waarvoor zij zijn gemaakt, een langere ontlaadtijd hebben (b.v. 20 of 30 uur) krijgen hun capaciteit bij die tijden aangegeven. Zo geeft men ook de capaciteit voor grotere tractie-accumulatoren (in het buitenland vindt men nog tractie met accu's) voor een normale ontlaadtijd van 3 uur. Men kiest de ontlaadtijd zo laag, omdat men dan met een zo klein mogelijk gewicht aan accucellen toe kan, want het gewicht (ze zijn loodzwaar!) van accu's vormt natuurlijk bij tractie, waar je vrij veel vermogen nodig hebt, een probleem op zichzelf. Uit een en ander volgt, dat je bij het bezien van de capaciteit ook even erop moet letten voor welke ontlaadtijd de accu bedoeld is.

Het rendement van een accucel is niet zo hoog en dat is uit economisch oogpunt al een bezwaar. Indien je b.v. een cel hebt met een capaciteit van 80 Ah, dan moet je méér Ah energie tijdens het opladen leveren, wil je de cel geheel laden, b.v. 100 Ah. Het ampère-uren-rendement is dan 80 %.

Het eigenlijke rendement is nog lager, want tijdens het laden is de spanning aan de klemmen hoger dan bij het ontladen. Nemen we aan, dat je met dezelfde stroom laadt en ontlaadt, dan moet je bij 80 % dus $^{100}/_{80}$ maal zo lang laden als je later weer zult kunnen ontladen. Daarbij is dan nog de spanning waarbij je die stroom moet leveren hoger dan hij zal zijn, wanneer je dezelfde stroom weer afneemt. Het vermogen in watts wordt ook bepaald door de spanning, zodat het eigenlijke rendement beslist lager is dan het ampère-uren-rendement. Daar komen dan natuurlijk nog bij de verliezen, die in de inwendige weerstand verdwijnen tijdens het ontladen en die je bij elke stroomopwekker vindt (dynamo's, droge elementen, enz.). Het resultaat is, dat het rendement van accu's niet hoger ligt dan ongeveer 75 %, hetgeen vergeleken bij andere electrische toestellen in de sterkstroom laag is.

techniek, maar zijn voor grotere stroomsterkten onpractisch omdat zij een hoge inwendige weerstand hebben.

Reeds in de radiotechniek maakt men bij grotere stroomsterkten gebruik van ontladingsbuizen met een gasvulling. In de sterkstroomtechniek gebruikt men algemeen als buis de kwikdampbuis. In fig. 107 is het principe van de kwikdampgelijkrichter aangegeven. Deze gelijkrichter is geschikt voor tweefasige gelijkrichting; van de éénfasestroom maakt men een tweefasestroom, door een transformator (hier een autotransformator) met een middenaftakking te nemen. De twee anoden in de buis zijn meestal van grafiet gemaakt; de kathode bestaat uit kwik. Bij het in bedrijf stellen van de gelijkrichter wordt de buis iets gekanteld, totdat het kwik bij A bij het kwik in de uitloper B kan komen. Over weerstand W zal dan een stroom lopen en wordt een boog getrokken, wanneer de buis weer recht geplaatst wordt. Deze boog zendt elec-

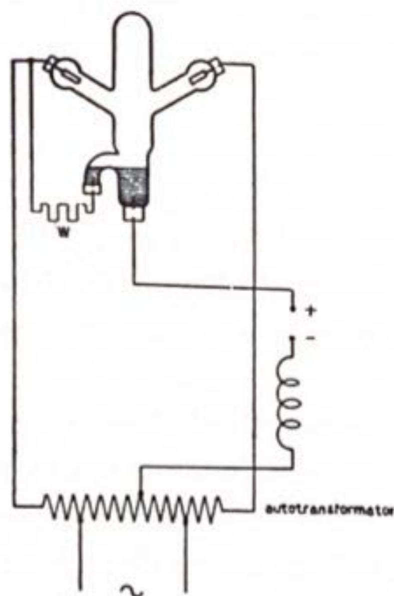


Fig. 107

gericht worden, zodat dubbelfasige gelijkrichting ontstaat.

Afhankelijk van de polariteit van het net (die 100 maal per seconde wisselt) zal een der twee anoden van de buis positief t.o.v. de kathode zijn. De andere anode werkt op dat ogenblik niet. Het resultaat is, dat beide helften der perioden van het éénfasenet gelijkgericht worden, zodat dubbelfasige gelijkrichting ontstaat.

De smoorspoel dient voor het enigszins afvlakken van de stroomvariaties na de gelijkrichting.

Voor groter vermogen, zoals bij electrische tractie, gebruikt men kwikdampgelijkrichters, die de draaistroom omzetten in gelijkstroom. Men kan dan voor elke fase dubbelfasige gelijkrichting toepassen door transformatoren te gebruiken, die voor elke fasewikkeling een middenaftakking hebben.

zwavelzuur te hoog zou worden. Bijvullen met accuzuur, een oplossing van zwavelzuur met de voorgeschreven dichtheid, zou dus niet gewenst zijn. Alleen water dient bijgevuld te worden. Dit moet echter water zijn, dat de platen van de accu niet aantast, zodat het volkomen schoon moet zijn. Men neemt voor het van tijd tot tijd bijvullen van de cellen dan ook gedistilleerd water. Het ergste dat men te vrezen heeft als verontreiniging van het water is chloor. Reeds kleine hoeveelheden chloor kunnen funeste gevolgen voor de platen van de accucellen hebben.

Gelijkrichters.

Gelijkrichters zijn apparaten, die van een wisselstroom een gelijkstroom kunnen maken. Hierbij wordt de stroom slechts in één richting doorgelaten, zodat natuurlijk geen zuivere gelijkstroom kan worden afgegeven.

Men kent metaalgelijkrichters, waarvan in hoofdstuk 4 een voorbeeld is te vinden, nl. voor het meten van wisselspanningen met de draaispoelmeter. Deze gelijkrichters hebben de eigenschap, dat zij de stroom in één richting veel beter doorlaten dan in de andere; geheel gelijkrichten doen zij dus niet. Voor grotere stroomsterkten zijn zij overigens niet geschikt, zodat men ze alleen in de zwakstroomtechniek tegenkomt.

Buisgelijkrichters hebben de eigenschap de stroom in één richting in het geheel niet door te laten. Zij werken met ontladingsbuizen. Een dergelijke buis heeft een kathode of negatieve electrode, die aan het gloeien wordt gebracht, waardoor electronen uit het kathodemateriaal worden vrijgemaakt. Deze electronen zouden om de kathode heen blijven zweven en aldaar een zgn. ruimtelading vormen, indien zij niet werden weggetrokken door de positieve anode. Zij bereiken aldus de anode en vloeien door de anode-leiding weer terug naar de kathode. Op deze wijze is er alleen maar een electronenstroom van kathode naar anode mogelijk, omdat uit de koude anode geen electronen kunnen vrijkomen. De electronenstroom betekent een stroom in tegengestelde richting, dus door de buis van anode naar kathode.

De buizen met hoogvacuum ballon, waarbij dus de electronen door het luchtledige gaan, worden wel veel gebruikt in de radio-

nl. door de telefoon worden gestuurd en wanneer men daarvoor gelijkgerichte wisselspanning uit het electriciteitsnet zou gebruiken, zou men door de rimpelspanning, die men altijd overhoudt, een brommen in de telefoon horen. Men zou deze rimpelspanning kunnen afvlakken, maar dat wordt een vrij kostbare geschiedenis. Wèl kan men tijdens het bedrijf de batterij bijladen, zonder dat de telefoondienst last heeft van brommen. Dit is dus ook een eigenschap van een accubatterij als bufferbatterij geladen, nl. dat de bromspanning van de dynamo wordt afgevlakt.

Het voordeel van de accumulator voor noodverlichting in bioscopen en andere gebouwen, waar een noodverlichting wordt vereist, is dat hij onmiddellijk kan worden ingeschakeld en daarbij geheel onafhankelijk is van welk net ook.

Voor duikboten is de accumulatorbatterij onmisbaar, omdat bij het varen onder water de motoren niet door diesel of benzine kunnen worden gevoed, daar hierbij gassen ontstaan, die men niet kwijt zou kunnen zonder zijn aanwezigheid te verraden. Aangezien de batterij slechts gedurende kortere tijden energie kan leveren voor de motoren, moest een duikboot vroeger van tijd tot tijd naar de oppervlakte komen om de diesels in te schakelen voor het bijladen van de accumulatoren. Men heeft tegenwoordig echter middelen gevonden om het bijladen onder water mogelijk te maken, zodat een duikboot zeer lang onder water kan blijven. Het varen op accu's heeft tevens het voordeel van veel minder geluid te maken dan explosiemotoren. Dit is van groot belang wanneer gevaren moet worden in de buurt van een vijandelijk schip.

Een accumulatorcel moet voor gasontwikkeling aan de bovenzijde geopend zijn. Tijdens het laden zullen waterstof en zuurstof aan de platen van de cel ontstaan. Deze moeten vrij kunnen ontsnappen. Dit houdt in dat open vuur niet geduld kan worden in zgn. accukelders, ruimten waar de grote batterijen zijn opgesteld, zoals dat b.v. in telefooncentralen het geval is. Tijdens het laden zal een mengsel van waterstof en zuurstof in de ruimte ontstaan en het gevaar voor explosie is dan niet meer denkbeeldig. Roken in een accukelder is dan ook ten strengste verboden.

Het zal duidelijk zijn, dat het water van de zwavelzuuroplossing zal verdampen, waardoor op den duur de concentratie van het

onmiddellijk uit fig. 112. Het verbreekcontact van de druksluiters moet goed werken, anders kan de tegenpartij geen signalen geven. Men moet nl. met de stroomloop altijd over het verbreekcontact van de andere druksluiter, hetgeen een bezwaar is wanneer deze niet van goede kwaliteit zijn.

Het schemateken van de druksluiter met verbreekcontact is in fig. 112 eveneens te zien. Deze behoeven niet groter te zijn dan de normale druksluiters met slechts één maakcontact.

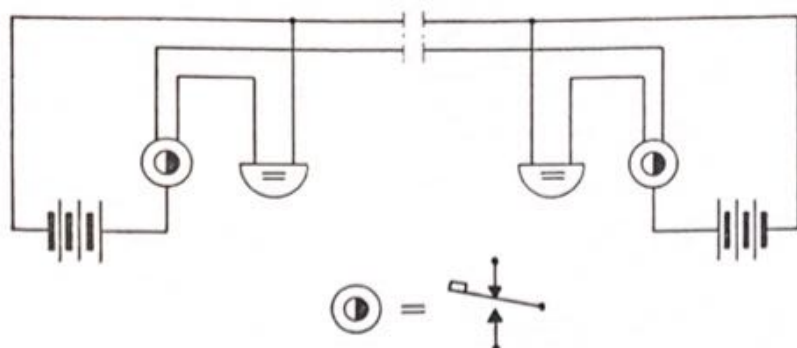


Fig. 112

Het bezwaar van eventuele slechte contacten in het schema van fig. 112 is voornamelijk, dat men niet meer op de verbinding kan vertrouwen. Men weet niet of het schelsignaal al of niet heeft weerklonken. Dit bezwaar kan worden ondervangen, door te zorgen dat behalve de schel aan de andere zijde van de verbinding ook de eigen schel weerklinkt. Ook om andere redenen kan deze eis worden gesteld. Wil men zekerheid hebben dat bij het werken van de eigen schel ook de schel aan het andere einde van de verbinding werkt, dan kan men ze beide in serie schakelen. Daartoe kan men geen gebruik maken van de gelijkstroomschel, daar deze periodiek de verbinding onderbreekt (onderbreekcontact van het anker). Men kent daarom de serieschel, die je misschien nog niet bent tegengekomen. Het principe van de serieschel is afgebeeld in fig. 113. Zoals je ziet, wordt hier hetzelfde bereikt voor het anker als bij de gelijkstroomschel het geval is, nl. dat het anker heen en weer beweegt en daarmee de klepel op de bel laat trillen. Hier is echter ook bereikt dat er doorlopend een verbinding tussen de klemmen van de schel bestaat. Er is nl. geen onderbreekcontact op het anker,

ling vanuit één punt signalen te kunnen geven op verschillende plaatsen, maar zo, dat slechts één plaats tegelijk een schelsignaal

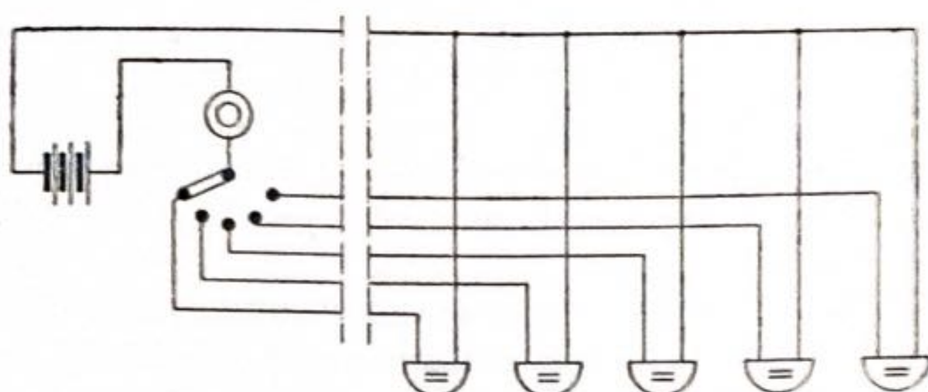


Fig. 110

krijgt. De werking van de installatie blijkt direct uit het schema. Er is slechts één onderbreker nodig, terwijl een keuzeschakelaar het kiezen van de gewenste schel mogelijk maakt.

Een heel vaak voorkomende eis is, dat tussen twee punten schelsignalen kunnen worden gegeven, echter vanuit elk punt naar het andere. Men maakt dan gebruik van één gemeenschappelijke retourleiding, waardoor men kan volstaan met drie leidingen in plaats van vier (voor twee afzonderlijke schelinstallaties).

In fig. 111 is dit systeem weergegeven. Wanneer de afstand tussen beide punten groot wordt, kan men beter gebruik maken

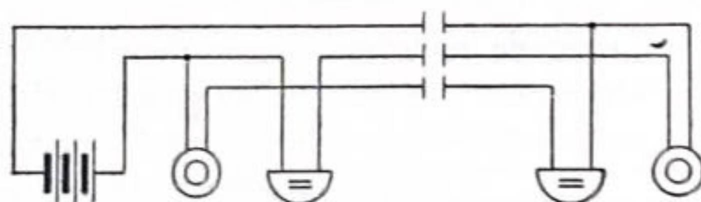


Fig. 111

van speciale onderbrekers en slechts twee draden. De onderbrekers moeten behalve een maakcontact ook een verbreekcontact hebben. Een maakcontact is een contact dat bij het in werking stellen (dus bij het drukken) gesloten wordt, dus gemáákt. Een verbreekcontact wordt juist geopend bij het drukken.

Hoe het mogelijk is met slechts twee draden uit te komen blijkt

HOOFDSTUK VIII

Signalering: Belsignalen - bijzondere schellen - serieschakeling - doorschellers - lichtsignalen - valklepsignalering - telegraaf - telex - oproepinstallaties.

Wanneer men iemand op een afstand wil waarschuwen, kan men gebruik maken van vooraf vastgestelde geluidsignalen of lichtsignalen.

Voor geluidssignalen neemt men vaak electrische schellen. Waarschijnlijk ken je de normale gelijkstroomschel wel. Zij bestaat uit een magneet, waarvoor een anker, een klein plaatje weekijzer, is geplaatst. Wanneer de stroom wordt ingeschakeld, zal het anker worden aangetrokken en een contact worden geopend, waardoor de stroom wordt onderbroken. Daardoor valt het anker terug, waardoor de stroom door het contact weer wordt ingeschakeld. Dit herhaalt zich steeds en aan het anker zit een klepel, die tegen de bel aan tikt waardoor je het geschel te horen krijgt.

Een dergelijke gelijkstroomschel is in fig. 108 schematisch weergegeven. In het normale schemateken is de werking nog na te gaan, maar in het verkorte teken niet meer, al spreekt het symbool wel voor zichzelf. De normale schelinstallatie is niet ingewikkeld (fig. 109). Op de stroombron wordt in serie de onderbreker met de schel aangesloten. Natuurlijk kan men verscheidene schellen parallel schakelen, om het signaal op verscheidene plaatsen tegelijk te kunnen geven, terwijl omgekeerd (wat vaker zal voorkomen) de mogelijkheid bestaat verscheidene onderbrekers parallel te schakelen, waardoor het mogelijk wordt van verschillende plaatsen uit de gemeenschappelijke schel te laten weerklinken.

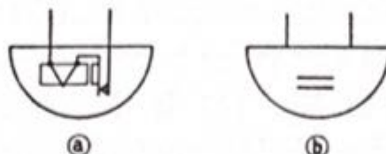
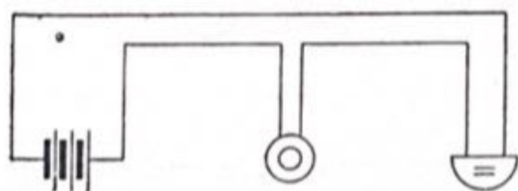


Fig. 108


Fig. 109

Een iets ingewikkelder geval geeft fig. 110. Hier is het de bedoe-

het veel minder hinderlijk is, maar kan echter alleen gebruikt worden voor het oproepen van bepaalde personen met wie men een afspraak heeft gemaakt. Op verscheidene plaatsen zijn daarvoor kastjes met lampen aangebracht. Met vier lampen kun je al heel veel mensen oproepen! De lampen zijn zodanig opgehangen, dat zij op zoveel mogelijk plaatsen te zien zijn. Bij het kastje is dan nog een schel; zie fig. 115.

Het oproepen gaat als volgt: kort klinkt de schel, waardoor iedereen die daarvoor in aanmerking komt, naar de lampen kijkt. De lampen gaan nu branden volgens een bepaalde code, die kenmerkend is voor de gezochte persoon. Degene die opgeroepen wordt, herkent direct zijn code en doet wat afgesproken is (of hij begeeft zich naar een afgesproken plaats, of hij stelt zich telefonisch met een bepaald nummer in verbinding).

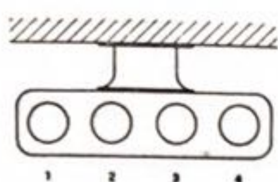


Fig. 115

Het aantal combinaties is zeer groot. Met vier lampen zijn het 2^4-1 mogelijkheden, dus 15 combinaties. Nu is dat niet veel, want in een groot gebouw zijn er al gauw 15 mensen, die men moet kunnen oproepen. Men kan het aantal combinaties bijvoorbeeld aanmerkelijk verhogen door onderscheid te maken tussen een lamp, die doorlopend blijft branden en een lamp die aan- en uitgaat. Vier lampen blijken dan in de meeste gevallen ruim voldoende te zijn voor grote bedrijven. Een bijzonderheid is nog, dat de lampen 1, 2, 3 en 4 verschillende kleuren hebben. Wanneer je op een afstand van het kastje staat en er brandt één lamp, dan wordt het nl. moeilijk om precies te zien welke lamp brandt. Soms moet je daarbij door enige ruiten heen kijken, die verscheidene afdelingen van elkaar scheiden. Daarom dient iedereen behalve zijn code ook de kleur te onthouden. Heeft iemand een code, waarbij alle lampen branden, dan is dat natuurlijk weer niet nodig, b.v. 1, 2 en 4 aan en nr. 3 flikkeren. Een andere code kan b.v. zijn 1, 2 en 4 aan en nr. 3 uit. In dat geval zie je de afstand tussen 2 en 4, zodat je ook de kleur niet hoeft te onthouden. Het systeem werkt in de practijk zeer goed.

Men kan het oproepsignaal-systeem combineren met de telefoon en dan bij het half-automatisch systeem de telefoniste opbellen en

dat naar beneden valt, zodat geen extra veer nodig is. Een cijfer wordt dan zichtbaar achter een raampje en men weet uit welke kamer werd gescheld. Tegelijk met het losmaken van het valklepje wordt een schel in werking gebracht, die het personeel waarschuwt, dat een klepje gevallen is. De installatie kan dan zo blijven, want bij een volgend schellen zal een ander klepje vallen. Nadat men op het signaal heeft gereageerd, stelt men de klepjes weer in hun oorspronkelijke stand, waarbij zij voor het oog niet meer zichtbaar zijn en vastgehouden worden totdat wederom de magneet bekrachtigd wordt. Meestal zijn de valklepsignalen in series van 4, 6, 12 en meer in een gemeenschappelijk kastje gebouwd. Met één toets kan men alle klepjes weer in hun ruststand brengen. Voor elke aansluiting moet natuurlijk een aparte leiding naar het valklepsignaal-kastje worden gelegd. Over deze leiding kan tevens de schel worden bediend, die natuurlijk voor alle aangeslotenen gemeenschappelijk kan zijn.

In vele gevallen kunnen geluidssignalen ongewenst zijn. Men gaat dan over op de lichtsignalen, vooral daar, waar geen ongewenst geluid mag doordringen (b.v. in radio-studio's) of waar door hun veelheid geluidssignalen irriterend op de mensen zouden werken (in grote kantoren, waar vaak gesignaleerd wordt of in grote warenhuizen).

Je begrijpt natuurlijk wel het principiële verschil tussen licht- en geluidssignalen. Geluiden kan men waarnemen onafhankelijk van wat men aan het doen is in een vertrek. Voor het waarnemen van lichtsignalen moet men juist naar het signaal kijken. Daarom worden licht- en geluidssignalen vaak gecombineerd. Een typisch voorbeeld daarvan is het oproepsysteem, dat je misschien wel eens hebt gezien, zonder te weten wat precies de bedoeling was.

In grote kantoren en warenhuizen e.d. gebeurt het vaak dat men iemand moet zoeken, waarvan men weet dat hij aanwezig is, maar naar wie het zoeken te veel tijd in beslag zou nemen. Men kan hem dan oproepen met een luidsprekersysteem. Dat systeem heeft het nadeel erg duur en erg hinderlijk te zijn voor de mensen, die daar de gehele dag naar moeten luisteren, maar heeft het voordeel, dat men er allerlei andere aankondigingen mee kan doen.

Het licht-oproepsysteem werkt daarentegen goedkoper, terwijl

maar een kortsluitcontact, waardoor de spoel van de magneet wordt kortgesloten bij aantrekken van het anker en dus het anker terugveert.

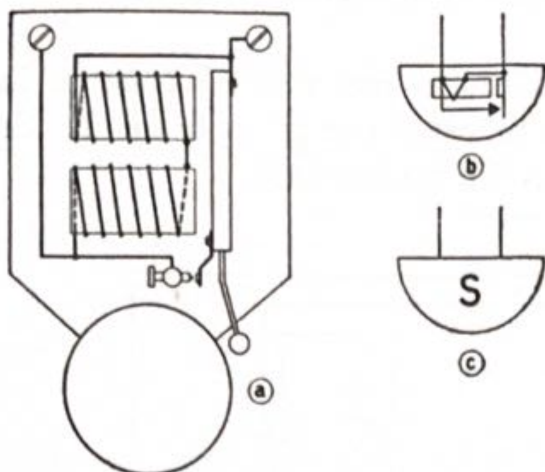


Fig. 113

In fig. 113b is het volledige schemateken en in fig. 113c het verkorte weergegeven. Deze schel kan ook gebruikt worden voor wisselstroom. Volledigheidshalve is in fig. 114 nog het schema getekend van de installatie met twee in serie geschakelde serieschellen.

Behalve de serieschel kent men nog verscheidene bijzondere typen schellen, zoals bijv. de doorscheller. Deze schel heeft de eigenschap, dat wanneer ze eenmaal wordt ingeschakeld ze uit zichzelf blijft schellen totdat men haar uitschakelt. Dit kan voor brand- en andere alarminstallaties zeer veel nut hebben. Zodra men hierbij de druksluiter indrukt, wordt met een magneet een pal aangetrokken, die een veer loslaat. Deze veer sluit een contact, waardoor de schel aangesloten wordt op de plaatselijke batterij en dus blijft schellen onafhankelijk of men de druksluiter al of niet loslaat. Met een pennetje kan men de pal weer spannen, waardoor de schel van de batterij wordt afgeschakeld.

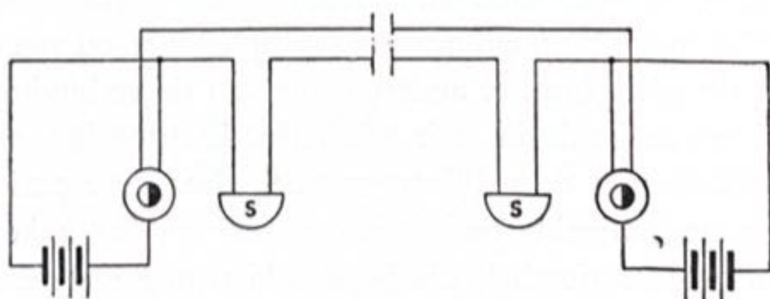


Fig. 114

Voor hotels e.d. maakt men veel gebruik van valklepsignalen. Deze bestaan eenvoudig uit een magneet, die een klepje vrijmaakt

Men kan verder gaan en met behulp van twee telefoonverbindingen drie extra telegraafverbindingen maken, zonder dat extra leidingen behoeven te worden aangelegd. De condensator en spoel bij elke telegraafpost (fig. 118) dienen om de in- en uitschakelstoten van de telegraaf te smoren, daar deze anders voor het telefoonverkeer toch hinder zouden veroorzaken.

De telegraaf van Morse heeft het bezwaar dat de seinen in de vorm van punten en strepen worden gegeven aan ontvangzijde. Het spreekt vanzelf dat men gezocht heeft naar telegraaftoestellen, die de seinen onmiddellijk in leesbaar schrift omzetten, en tevens heeft getracht het seinen automatisch te maken, daar het werken met een seinsleutel flink wat oefening vereist, terwijl seinen voor opname op de band betrekkelijk langzaam gaat.

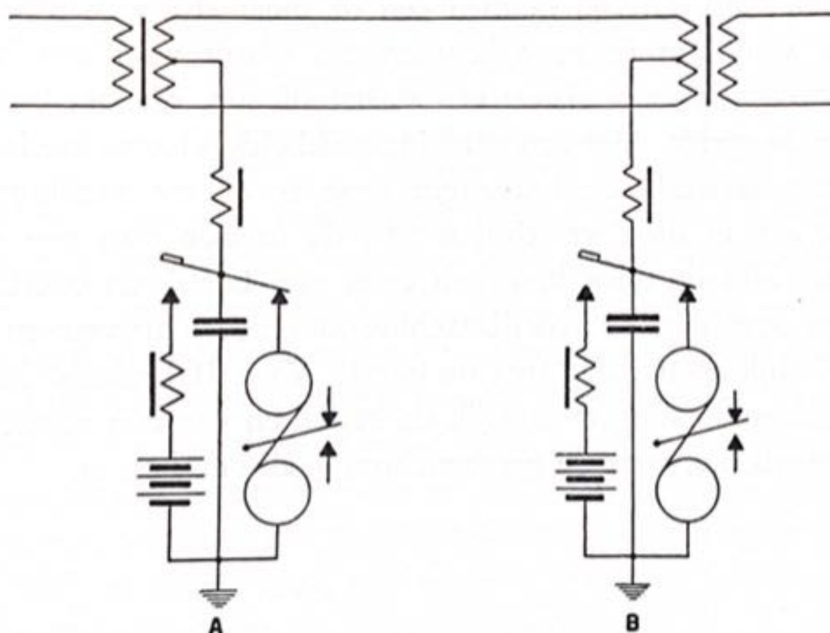


Fig. 118

Er zijn verscheidene soorten telegraaftoestellen gemaakt, die veel sneller werken en leesbaar schrift geven, doch betrekkelijk ingewikkeld zijn, waarom wij ze dan ook hier niet zullen behandelen. Al dat speuren heeft tenslotte geleid tot de telex-toestellen, die aan zendzijde als een normale schrijfmachine te bedienen zijn, zodat elke typiste er mee kan werken. Aan ontvangzijde worden de seinen onmiddellijk in normaal machineschrift omgezet, zodat geen decoderen nodig is.

Vaak komt het voor, dat men een telegraaflijn maakt met verscheidene tussengelegen posten. Men verlangt dan dat al die posten meewerken, wanneer aan het ene einde geseind wordt. Dit is onder

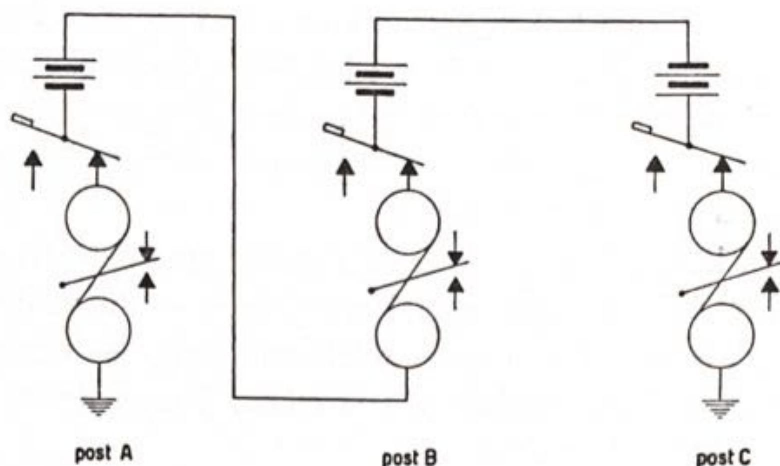


Fig. 117

meer het geval bij de telegraaf, die bij de spoorwegen in gebruik is. Men is met een dergelijke installatie in staat aan het einde van een lijn berichten te geven aan alle tussengelegen stations, b.v. over de loop van een trein. De stations worden dan in serie geschakeld, maar kunnen dan toch nog afzonderlijk seinen.

Wanneer men de beschikking heeft over telefoonleidingen, die altijd bestaan uit twee aders, kan men daarbij een telegraaflijn maken zonder extra draadverbindingen. Hoe dit gaat, is in fig. 118 in principe weergegeven. De telefoonverbinding bevat aan beide einden transformatoren, waarvan aan een kant middenaftakkingen op de spoelen zijn aangebracht. Op deze middenaftakkingen kan men nu de telegraaftoestellen aansluiten. Deze telegraafverbinding zal dan in het geheel geen storing geven voor de normale telefoonverbinding. De stroom die van A naar B loopt, wanneer de seinsleutel in A wordt neergedrukt, verdeelt zich gelijkmatig over beide aders van de telefoonleiding, dank zij de middenaftakking van de transformatoren. Hoewel beide aders van de telefoonlijn dus een verbinding voor de telegraaf tussen A en B vormen, zal er geen spanningsverschil ontstaan tussen de twee aders van de telefoonverbinding onderling, zodat het telefoonverkeer geen hinder van het telegraafverkeer ondervindt.

vragen of zij mijnheer Jansen wil oproepen. Het gevraagde signaal wordt doorgegeven en de heer Jansen belt de telefoniste op, die hem dan met de oproepende persoon verbindt.

Een stapje verder : men belt wederom de telefoniste op en vraagt naar Jansen. Zij geeft het signaal en bemoeit er zich verder niet mee, want de heer Jansen vindt op elk telefoontoestel een gele knop, die hij slechts behoeft in te drukken om met de oproepende te spreken. Daarvoor moet je echter de telefoniste over een bepaalde lijn (een bepaald nummer) oproepen.

Nog een laatste stap en de zaak is geheel automatisch: je draait met de kiesschijf het oproepgetal van Jansen — dit vind je in de telefoongids naast zijn normaal telefoonnummer — waardoor de oproepinstallatie automatisch gaat werken. Jansen drukt de gele knop in en je kunt spreken.

Een bijzondere vorm van signalering zijn de telegraaf en de telefoon. De telegraaf berust op het seinen met Morse-tekens. Met behulp van een seinsleutel kunnen kortere en langere stroom-impulsen over de telegraaflijn naar de Morseschrijver worden gezonden. Deze bestaat in principe uit niets anders dan een magneet, die bij bekrachtiging een geïnkt pennetje tegen een rol papier drukt. Daar de rol met constante snelheid afloopt, zullen op het papier punten en strepen (de punten zijn in werkelijkheid kortere streepjes) worden opgetekend. Door combinaties van punten en strepen kunnen alle letters van het alfabet, cijfers en andere tekens worden overgeseind.

In fig. 116 is de schakeling weergegeven van een eenvoudige telegraafverbinding, waarbij je kunt zien, dat seinsleutels, Morseschrijvers en plaatselijke batterijen in serie worden geschakeld. Er wordt slechts één draad toegepast, terwijl als retourleiding van de aarde gebruik wordt gemaakt.

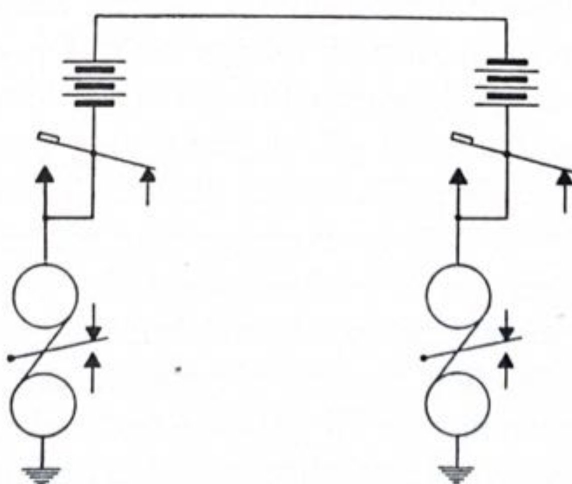


Fig. 116

Hierdoor wordt de electrische stroom in de keten veranderd in het rhythme van de spraaktrillingen. De telefoons reageren op deze stroomtrillingen en leveren daarbij weer geluidstrillingen. Spreek je dus, dan is dit in beide telefoons hoorbaar, dus ook in je eigen telefoon. Dit kun je merken door in de microfoon te blazen, hetgeen meteen een middel is om na te gaan of je nog in verbinding staat met de andere abonné.

Daar iedere abonné met elke telefonisch aangeslotene wenst te kunnen spreken, moet een geheel net van draden worden gemaakt en al spoedig blijkt een centrale post nodig, waar elkeen met elkeen kan worden verbonden.

Oorspronkelijk geschiedde dat algemeen door tussenkomst van een telefoniste. Elke abonnélijn eindigde op een bord. Nam de abonné de hoorn van de haak, dan werd door de haakcontacten de stroomkring ingeschakeld en begon naast je lijn op het klinkenbord in de centrale een lampje te branden. De telefoniste wist dan dat je wachtte op een verbinding en zodra zij vrij was, vroeg ze naar het verlangde nummer. Door middel van koorden (twee-aderige verbindingssnoeren met aan de uiteinden speciale stekers) kon men dan de ene abonné met de andere verbinden.

Naarmate het aantal abonné's steeg werd het economischer de telefoonverbindingen te automatiseren. Reeds bij middelmatige centrales kreeg men last van het grote aantal abonné's doordat het niet meer mogelijk was b.v. alle lijnen op één bord te laten eindigen en verscheidene borden nodig waren met evenveel telefonisten, die toch elke lijn moesten kunnen bereiken, zodat vrij uitgebreide installaties ontstonden.

Tegenwoordig heeft men nog wel handcentrales, maar hoe langer hoe meer gaat men tot automatiseren over; in Nederland is men daar al heel ver mee en zou men nog meer gevorderd zijn wanneer wij geen oorlog achter de rug hadden, die elke verdere ontwikkeling had stopgezet, terwijl bovendien een geweldige hoeveelheid apparatuur werd vernield, die eerst na de oorlog kon worden vernieuwd.

De automatische telefonie laat de abonné zelf de verbinding op zo eenvoudig mogelijke wijze tot stand brengen. Als je echter bedenkt, dat van het moment dat je de micro-telefoon van de haak neemt tot het ogenblik dat je die er na de verbinding aan hangt

HOOFDSTUK IX

Telefonie: principe van de telefoon - handcentrales - principe van de automatische telefonie voor kleine en grote centrales - interlocale telefonie - districten - knooppuntcentrale en eindcentrale.

Principe van de telefoon.

Zonder telefoon is onze hedendaagse maatschappij volkomen ondenkbaar. Al maak je er zelf misschien niet zoveel gebruik van, er zijn diensten, die voor je werken en die er niet buiten kunnen. De telefoon stelt de mens in staat berichten van elke aard met de grootst mogelijke snelheid over te brengen. Als zodanig valt telefonie ook wel onder signalering, maar het is als het ware de ideale vorm wat betreft de snelheid en de toepassingsmogelijkheden. Behalve het feit, dat de berichten niet schriftelijk kunnen worden vastgelegd, heeft de telefoon alle voordelen t.o.v. andere vormen van signalering.

Vele bedrijven kunnen beslist niet werken zonder de telefoon. Denk alleen maar eens aan een bedrijf als dat van de spoorwegen, waar men in staat moet zijn onmiddellijk berichten door te geven over een gewijzigde treinloop, enz. Bij kortere afstanden tussen de stations en grotere frequenties der treinen, m.a.w. bij locaal verkeer, zoals wij dat eigenlijk in ons kleine Nederland hebben, is zelfs de telegraaf in vele gevallen te traag!

Het principe van de telefoon is niet moeilijk en trouwens het principe van de hele automatische telefonie is dat niet. Maar door de veelheid wordt de zaak wel ingewikkeld! In de eenvoudigste vorm bestaat een telefoonverbinding uit de serieschakeling van twee microfoons en twee telefoons met een batterij. In fig. 119 is dat schematisch voorgesteld. Door de batterij ontstaat een gelijkstroom in de keten, die gesloten is. De gelijkstroom veroorzaakt geen geluid in de telefoons. Door voor de microfoon te spreken wijzigt men de weerstand van de (kool)microfoon.

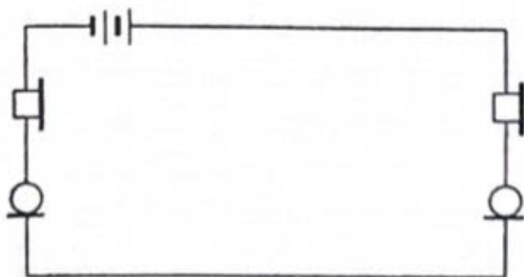


Fig. 119

De Morse-telegraaf zal op den duur door de telex geheel worden verdrongen. Weliswaar was de telex tot voor kort nog niet bruikbaar voor radioverbindingen doordat de ontvangtoestellen reageerden op stoorsignalen, maar sinds kort beschikt men over de TOR (telex op radio), een vinding van de Nederlandse PTT. Deze TOR wordt nog verder geperfectionneerd, maar het schijnt dat men reeds zover is, dat het telexverkeer over radio in verband met de storingen geen probleem meer vormt. Mettertijd kan dus wel verwacht worden dat de Morseseinen geheel zullen verdwijnen, al hebben zij lange tijd goede diensten bewezen, waar andere verbindingsmogelijkheden ontbraken.

Bij de snelwerkende moderne telegraaf- en telextoestellen maakt men gebruik van combinaties van stroomstoten, b.v. series van 5 stroomstoten. Hierbij kunnen een of meer stoten worden weggelaten, waardoor de serie kenmerkend wordt voor een bepaald teken. Steeds moet er echter een startstoot zijn, die het begin van de serie aangeeft. Met een zeer ingewikkelde electro-mechanische installatie verwerkt de ontvanger deze codes tot aanslagen met toetsen, die in niets verschillen van de toetsen van een schrijfmachine. Met de telex kan men even snel berichten overbrengen als men deze met de schrijfmachine kan neerschrijven en dat is aanmerkelijk sneller dan met de hand! Vanzelfsprekend kan men verscheidene ontvangers tegelijk de berichten van één zender doorgeven, zoals b.v. voor de persberichten vaak gewenst is.

telefooncentrale. Zou men nu aan het einde van elke lijn van een abonné in de centrale een kiezer moeten aansluiten, dan zou de centrale onmogelijk groot en duur worden. Bovendien zou dit weinig economisch zijn, daar geen enkele abonné aan één stuk door wil telefoneren. De meeste abonné's zelfs zullen per dag een betrekkelijk zeer gering aantal oproepen doorgeven.

Daarom gebruikt men in de centrale een aantal kiezers, die slechts een fractie vormen van het aantal abonné's. Hoeveel kiescircuits er moeten zijn per 100 abonné's is een der lastigste problemen van de automatische telefonie. In de practijk bedraagt het slechts enkele procenten, b.v. 7 circuits per 100 abonné's. Natuurlijk zal het mogelijk zijn, dat wanneer in een groep abonné's, die gezamenlijk over 7 circuits beschikken, ook werkelijk zeven toestellen aan het telefoneren zijn, de achtste, die probeert iemand op te roepen, daarin niet zal slagen. In dat geval zul je bij het opnemen van de telefoon onmiddellijk de bezettoon horen. In werkelijkheid gebeurt dit vrijwel nooit, omdat het aantal circuits voldoende is. Daarbij worden natuurlijk de abonné's, die vaak moeten telefoneren en diegenen, die maar zeer weinig van de telefoon gebruik maken, goed onder elkaar verdeeld. Bovendien kan men er nog voor zorgen, dat wanneer in een groep van 100 abonné's alle circuits bezet zijn, een volgende abonné gebruik kan maken van een circuit van een andere groep van 100, indien daarin nog een vrije verbinding mogelijk is.

De werking van de kiezers geschiedt geheel automatisch, waarbij het alleen nodig is door middel van de kiesschijf impulsen te geven die de kiezer op het goede contact dient te brengen. Zo wordt in het bovenbeschreven geval van de hef-draaischakelaar automatisch gezorgd, dat de 8 impulsen van nummer 86 naar de hefmagneet worden gevoerd, terwijl de 6 impulsen van dat nummer, dus van het tweede cijfer, de hefmagneet juist niet kunnen bereiken, maar toegevoerd worden aan de draaimagneet. Er moet b.v. ook voor gezorgd worden, dat tijdens het draaien van de contactarm in een laag contacten, deze arm geen spanning voert, daar hij bij het passeren van de contacten invloed zou kunnen hebben op aangesloten relais van andere dan het gewenste nummer. Bij het bereiken van het gewenste nummer daarentegen moet aan de contactarm juist wèl een spanning worden gegeven, zodat de relais van het

tot onpractische constructies. Men gebruikt voor het geven van de schakelimpulsen een zgn. kiesschijf, die op het telefoontoestel is gemonteerd en die van 1 tot 10 impulsen kan geven bij elke keer dat ze gedraaid wordt. Het geven van b.v. 75 impulsen zou te lang duren. Daarom heeft men schakelaars gemaakt waarmee je, komende van een lijn 100 richtingen uitkunt, maar bij het kiezen vanuit de neutrale stand niet over alle contacten behoeft te gaan. De 100 contacten van de schakelaar zijn opgesteld in tien rijen van tien contacten. De schakelarm van de stappenschakelaar kan links van het contactenvlak omhooggeheven worden, terwijl hij, op een bepaalde hoogte gekomen, kan indraaien in een bepaalde rij contacten en met deze dan een verbinding kan maken. Deze schakelaars dragen dan ook de naam van hef-draaischakelaars. Het heffen kan geschieden door middel van een electromagneet, die een palmechanisme bedient en het wordt gestuurd door de eerste serie impulsen, die met de kiesschijf worden gegeven. Draai je dus b.v. een 8 met de kiesschijf, dan krijgt de hef-draaischakelaar 8 impulsen, die op de zgn. hefmagneet worden aangesloten. De schakelarm van de kiezer zal dus (links van de contacten) omhooggaan totdat hij op de hoogte van de achtste laag contacten gekomen is. Daar blijft hij dan staan. Draaien we vervolgens een 6 op de kiesschijf, dan worden door deze 6 impulsen naar de centrale gestuurd. Deze impulsen worden nu doorgegeven aan de draaimagneet, waardoor de contactarm van de schakelaar gaat draaien (langs de achtste rij contacten) totdat hij komt te staan op contact 6 en daarmee een verbinding tot stand brengt. We hebben met die kiezer dan nummer 86 gekozen en hebben dit kunnen doen zonder alle contacten te passeren, hetgeen vrij veel tijd in beslag zou nemen. Bovendien hebben wij hierbij de hulp van een kiesschijf, die slechts tien cijfers heeft, hetgeen ook de bediening erg vergemakkelijkt.

Inmiddels kan men dus met een dergelijke hef-draaischakelaar vanuit één lijn komende slechts 100 uitgangen bereiken, zodat maar 100 abonné's kunnen worden bereikt. Daarom zal voor een groter aantal abonné's een aantal van dergelijke kiezers achter elkaar geschakeld moeten worden.

De kiezers met de bijbehorende relais voor het automatisch laten werken ervan zijn natuurlijk zeer kostbare onderdelen van een

een paar honderd schakelingen zijn verricht, dan zul je begrijpen wat er bij komt kijken! Het telefoontoestel staat met twee aders, een zgn. aderpaar, met de centrale in verbinding. Onder de straat loopt de telefoonkabel waarin een groot aantal aderparen. Deze kabel eindigt met vele andere in de centrale op de verdelers. Dit zijn rekken, waar de aderparen op worden verdeeld naar de mate waarin zij gebruikt worden.

Door middel van zgn. stappenschakelaars is het mogelijk op afstand te schakelen. Een stappenschakelaar bestaat uit een as waarop een aantal (b.v. drie) contactveren zijn gemonteerd, natuurlijk van elkaar en van de as geïsoleerd. Deze contactveren kunnen, wanneer de as draait, verbinding maken met één stel vaststaande contacten in een bepaalde stand. Zo kunnen er b.v. 12 standen zijn, dus ook 12 maal 3 contacten. We hebben zodoende als het ware een driepolige schakelaar met 12 standen. Het eigenaardige van de schakelaar is echter dat hij met stroomstoten kan worden gedraaid. Er is nl. een magneet aan de schakelaar gebouwd. Wanneer deze bekrachtigd wordt, wordt een pal door het anker van de magneet opgelicht. Wordt de stroom door de magneetspoel onderbroken, dan gaat de pal met het anker van de magneet naar zijn oorspronkelijke stand, maar daarbij laat hij de contacten van de schakelaar één stand verder draaien. Dit is mogelijk doordat de pal op een palwiel werkt, dat gemonteerd is op de as van de schakelaar.

Veronderstel eens dat de schakelaar op de normaalstand staat en dat je hem op stand 6 wil plaatsen. Door 6 stroomstoten door de magneet te sturen — en dat kan je vrij vlug achter elkaar doen — kun je dat bereiken.

Met behulp van de bovenbeschreven stappenschakelaar kun je dus komende vanuit een lijn 10 verschillende richtingen uit (de eerste stand doet niet mee, want dat is de normaalstand; de laatste stand wordt voor speciale doeleinden gereserveerd). Kortom met een dergelijke schakelaar kun je een keuze maken uit 10 verschillende abonné's!

Nu zijn 10 abonné's van geen betekenis; het gaat om veel grotere aantallen. Voor 100 abonné's zou je een schakelaar moeten hebben met 100 standen, maar dan zou je ook in staat moeten zijn van 1 tot 100 impulsen (stroomstoten) te kunnen geven. Dit zou leiden

Van dat ogenblik af kan men dus gaan kiezen en stuurt men met de nummerschijf de eigenlijke kiezers. Alleen *deze* zijn hef-draaischakelaars; de oproepzoekers en voorkiezers zijn stappenschakelaars die alleen *draaien.*

De kiezers worden onderscheiden in groepenkiezers en eindkiezers. De eindkiezers zijn de laatstvoorkomende in een circuit en zij worden dus ingesteld door de laatste twee cijfers van het nummer van de abonné. De groepenkiezers dienen voor het kiezen van een groep nummers. Schematisch is dit voorgesteld in fig. 120. Hierin stelt, zoals gebruikelijk is in telefoonschema's, een contactarm met één boogje een draaischakelaar (stappenschakelaar) voor, terwijl een met twee boogjes een hef-draaikiezer aanduidt. We zien in de figuur drie groepenkiezers, die verbonden zijn met de uitgangen van de voorkiezer (geheel links in de figuur). Verder zien we geheel rechts drie eindkiezers. Aangenomen is, dat we te maken hebben met een centrale voor 1000 lijnen, waarbij elk nummer dus kan bestaan uit drie cijfers. In werkelijkheid zullen dan geen 1000 abonné's kunnen worden aangesloten, omdat er dan 99 zouden zijn, die een nummer beginnende met een nul zouden krijgen, hetgeen minder gewenst is, maar niet onmogelijk. Nummers beginnende met een nul kan men evenwel reserveren voor speciale diensten (informatie, tijdmelding, enz.).

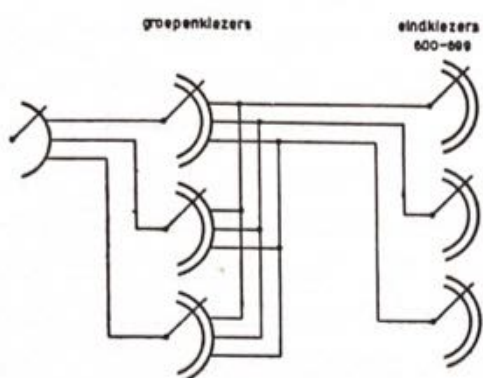


Fig. 120

De drie getekende eindkiezers behoren tot de groep 600 tot en met 699. Stel, dat er maar één eindkiezer voor deze groep was, dan zou zodra iemand een nummer tussen 600 en 699 opbelt een tweede abonné in deze groep niet meer kunnen worden bereikt. Daarom moeten er verscheidene eindkiezers zijn, waarbij de uitgangen van de kiezers (100) parallel worden verbonden. Het aantal kiezers kan per 100 klein blijven, maar dient natuurlijk weer zo groot te zijn, dat vrijwel nooit de bezettoon verkregen wordt wanneer de opgeroepene niet werkelijk bezet is. Nemen we dus aan, zoals in fig. 120 is te zien, dat voor de groep 600—699 drie eindkiezers zijn geno-

alleen maar kan draaien, maar veel meer dan 10 uitgangen heeft, b.v. 300. Op zo'n schakelaar zijn dus op de 300 uitgangen 300 abonné's aangesloten. Zodra nu een der abonné's de hoorn opneemt, zal de oproepzoeker gaan draaien en gaan zoeken naar de lijn die oproept. Bij die lijn aangekomen staat de zoeker stil en is de lijn met een kiescircuit verbonden. De abonné kan dus een aanvang maken met het geven van impulsen met de kiesschijf.

Hierbij valt op te merken, dat in de eerste plaats het zoeken van de oproepende abonné enige tijd kost. Dit hoeft niet zó lang te duren, daar de oproepzoekers vergeleken bij de normale kiezers zeer snel draaien. Het spreekt vanzelf, dat het geven van kiesimpulsen met de kiesschijf geen zin heeft vóórdat de abonné verbonden is met een kiescircuit. Daarom is de zgn. kiestoon ingevoerd. Deze geeft aan, dat de verbinding met een kiescircuit tot stand is gekomen. Dit kan even duren omdat gezocht moet worden naar een vrij kiescircuit. Nadat de oproepzoeker dus je lijn heeft bereikt, kan een andere abonné deze oproepzoeker niet bezetten, maar moet naar nog een kiescircuit worden gezocht. Dit geschiedt door middel van de zgn. voorkiezers. Deze zijn dus verbonden met de oproepzoekers, terwijl hun uitgangen verbonden zijn met de beschikbare kiescircuits. Vindt nu een voorkiezer tenslotte geen vrij circuit, dan krijg je wel de bezettoon, maar zoals gezegd, dit komt practisch niet voor. De voorkiezers zijn draaiende kiezers.

Ten tweede valt op te merken, dat de 300 abonnélijnen, waarover wij het hier hadden, natuurlijk verbonden zijn met verscheidene oproepzoekers, die (met hun uitgangen) gewoon parallel zijn geschakeld. Zou dit niet het geval zijn, dan zou één abonné bij het telefoneren meteen de 299 andere abonné's het oproepen onmogelijk maken.

Wanneer de hoorn van de haak wordt genomen, wordt het lijnrelais bekrachtigd, hetgeen de oproepzoekers aan het draaien brengt. Bovendien wordt op het c-contact van de oproepende lijn een spanning aangesloten. Zodra een zoeker de lijn bereikt, wordt hij door het signaal van het c-contact tot staan gebracht en begint de bijbehorende voorkiezer te zoeken naar een vrij circuit. Dit wordt als regel wel gevonden en zodra de verbinding met het circuit tot stand gekomen is, hoort men de kiestoon.

gewenste nummer bekrachtigd worden en op die manier de verbinding met een volgende kiezer dan wel met het gewenste nummer tot stand komt. Het automatisch laten werken van de kiezers en op het juiste moment doorgeven van een impuls aan de contactarm enz. geschiedt met behulp van relaisschakelingen, zodat een kiezer steeds enige relais nodig heeft die dienen voor zijn sturing.

Ook wanneer de verbinding verbroken moet worden na het voeren van het telefoongesprek, moeten de kiezers geheel automatisch naar de nulstand teruggebracht worden, opdat zij klaar staan voor het vormen van een volgende verbinding tussen andere abonné's. Door het op de haak leggen van de hoorn zullen contacten gesloten worden, waardoor (weer met behulp van stuurrelais) de kiezers automatisch naar hun nulstand worden gebracht. Daarbij zal een hef-draaischakelaar in de laag waarin hij zich tijdens de verbinding bevond doordraaien, waarna hij langs de rechterzijde van het contactenvlak naar beneden valt, terwijl hij beneden aangekomen onder invloed van een veer van rechts-beneden naar links-beneden terugdraait. Hij staat dan weer klaar voor een volgende verbinding.

Bij het maken van een verbinding zullen steeds twee geleidingen van het gesprek-circuit met elkaar moeten worden verbonden. Men noemt deze verbindingen a en b. Op deze geleidingen kan men geen signalen aansluiten, die dienen voor de stuurrelais, e.d. Daarom heeft men ook nog een c verbinding nodig, die met het gesprekcircuit niets te maken heeft maar alleen dient om stuursignalen door te geven.

Een hef-draaischakelaar zal dan ook 3 maal 100 contacten hebben met 3 contactarmen. De armen zijn op één as gemonteerd, gaan tegelijk omhoog en draaien dus ook tegelijkertijd langs de contacten, een in iedere groep a, b of c.

Zoals we zagen, zal niet iedere abonné over een circuit behoeven te beschikken. Wel zal het nodig zijn, dat hij bij het opnemen van de hoorn door middel van de haakcontacten verbonden wordt met een kiescircuit. Dit is als volgt mogelijk. Zodra een telefoon wordt opgenomen, wordt door middel van de haakcontacten een stroomkring gesloten over de telefoonlijn. Daardoor wordt een zgn. lijnrelais, waar elke lijn over beschikt, bekrachtigd. Nu eindigen alle lijnen op een zgn. oproepzoeker. Dat is een stappenschakelaar die

Stel b.v. dat je bij het kiezen van 7283 de cijfers 728 draait en eenvoudig niet verder gaat. Je laat de hoorn van de haak en je gaat wat anders doen. Dat hoeft geen opzet te zijn, maar er zijn nu eenmaal mensen, die plots het laatste cijfer vergeten zijn. Ze gaan dan eerst even in het telefoonboek kijken en dan kookt opeens de melk over en het resultaat is, dat de hele verbinding vergeten wordt. Er zijn inmiddels twee groepenkiezers en een eindkiezer in gebruik, kortom een heel spreekcircuit wordt voor niets bezet gehouden. Er bestaat dan een schakeling, die na enige (niet te lange) tijd de hele zaak verbreekt, waardoor ook de abonné afgeschakeld wordt. Meestal gaat dit gepaard met het geven van de bezettoon. Bij de interlocale dienst bestaat ook zoiets bij het wekken. Wanneer je iemand automatisch interlocaal oproept, dan hoor je, nadat de verbinding tot stand is gebracht, de wektoon, een wisselstroompje met een bepaalde frequentie, die overigens niets te maken heeft met het geluid dat de schel produceert en zelfs niet tegelijkertijd optreedt. Tijdens het wekken bezet je een interlocale lijn, een duur gesprekcircuit dus. Nadat de wektoon een tiental keren geklonken heeft, word je automatisch afgeschakeld (en hoor je de bezettoon).

Een dergelijke inrichting bestaat ook voor het geval je wel een volledige verbinding tot stand hebt gebracht, zodat je met elkaar hebt gesproken. Neem aan, dat beide abonné's in dat geval vergeten de hoorn op de haak te leggen, dan blijft dus een gesprekcircuit bezet. Na enige tijd wordt deze echter automatisch verbroken. Deze tijd moet echter langer zijn dan zojuist het geval was, daar de abonné's toch vrij met elkaar een gesprek van enige tijd moeten kunnen voeren. Daarom moeten weer andere schakelingen gemaakt worden, die deze tijd beperken. Bij de interlocale dienst bedraagt deze tijd op het ogenblik 9 minuten. Bij de locale dienst is dit veel langer.

De bijzondere signalen worden in de centrale gemaakt door een gemeenschappelijke signaalgever. Deze bestaat eenvoudig uit een electromotor, die continu draait. Op de as zijn verscheidene nokkenschijven gemonteerd, die contacten sluiten en daarbij signalen in de vorm van wisselspanningen van verschillende frequenties geven. Zo heb je de wektoon, de bezettoon en de informatietoon (dit zijn twee toontjes, die om en om weerklinken en erop wijzen dat het

kiezers zijn parallel de drie eindkiezers van de 600-groep geschakeld. Natuurlijk moeten we dan ook groepen eindkiezers voor de andere groepen (100, 200, 300, enz.) verbinden aan dezelfde groepenkiezers, respectievelijk aan de lagen 1, 2, 3 enz. Het aantal groepenkiezers van 3 is dus onvoldoende, want nu kunnen totaal slechts drie abonné's in deze centrale oproepen, terwijl bij het aantal der eindkiezers aangenomen is, dat drie abonné's tegelijk drie nummers in één groep kunnen oproepen; en er zijn 9 groepen (de 000-groep niet meegerekend).

Nu kun je je afvragen wat er gebeurt wanneer de groepenkiezer, die je door de voorkiezer ter beschikking is gesteld, geen vrije eindkiezer vindt. Na het heffen zal hij immers in de contactenlaag indraaien en wel net zo lang totdat hij een vrije eindkiezer vindt. Zijn nu in een groep alle eindkiezers bezet, dan draait de groepenkiezer dóór en valt in zijn ruststand terug. Hij gaat dan natuurlijk niet nog eens zoeken en je krijgt de bezettoon te horen. Dit gebeurt betrekkelijk vaak, zodat je het wel eens kunt meemaken, dat je de bezettoon hoort vóórdat je alle cijfers van het nummer, dat je wenst te bereiken, hebt gedraaid.

Bij een centrale met méér dan 900 abonné's krijgt men nummers met vier cijfers. De groepenkiezers in fig. 120 worden dan verbonden met een laag van een stel groepenkiezers daarvoor. M.a.w. tussen voorkiezers en groepenkiezers komen dan nog groepenkiezers. Wanneer je dus b.v. nummer 7283 wenst op te roepen, zoekt de voorkiezer een vrije *eerste groepenkiezer*. Je draait cijfer 7. De eerste groepenkiezer heft 7 stappen en draait automatisch in laag 7. Daarbij zoekt hij naar een vrije *tweede groepenkiezer*. Dit gaat weer snel genoeg, zodat je rustig kunt doorgaan met het draaien van de 2. Tenslotte zal dus de tweede groepenkiezer in laag 2 draaien en naar een vrije eindkiezer in de groep 7200 zoeken, waarna je de 8 en de 3 draait. Je begrijpt, dat een en ander vrij ingewikkeld wordt door de veelheid, maar het principe van de automatische telefonie is allerminst lastig te doorgronden.

Ingewikkeld zijn ook de vele soorten relaisschakelingen, die men moet bedenken om automatische handelingen tot stand te kunnen brengen. Een voorbeeld daarvan is het automatisch afschakelen van een abonné-lijn, die halverwege blijft steken.

men (in werkelijkheid zijn het er méér), dan zijn de uitgangen van deze drie eindkiezers parallel met elkaar verbonden en met de 100 abonné's van deze groep. De ingangen van deze kiezers zijn verbonden met de groepenkiezers en wel met de contacten van de zesde laag. We zullen nu zien waarom.

De werking van het geheel gaat als volgt. Stel we wensen nummer 655 op te bellen. Na het afnemen van de hoorn worden we automatisch verbonden met één van de drie groepenkiezers. Indien b.v. de eerste twee bezet zijn, dan zoekt de voorkiezer verder, vindt de derde vrij en wij krijgen de wektoon. Met behulp van de kiesschijf kunnen we nu de groepenkiezer laten werken. We draaien dus een 6 en de kiezer heft tot de zesde laag contacten. Direct na het heffen draait de kiezer (geheel automatisch) in de laag en wel net zo lang totdat hij een vrije eindkiezer van deze groep heeft gevonden. Is b.v. nummer 624 juist opgebeld, dan is de eerste eindkiezer van deze groep bezet. De groepenkiezer draait dan in de zesde laag verder en vindt b.v. dat de tweede eindkiezer vrij is. Dit draaien gaat zo snel, dat je er niets van merkt en dat de groepenkiezer al een vrije eindkiezer heeft gevonden voordat je het tweede cijfer draait. Je draait dan een 5 en de tweede eindkiezer heft vijf stappen. Deze eindkiezer is *niet* voorzien van een inrichting die hem in de laag laat draaien zodra hij klaar is met heffen. Integendeel hij blijft rustig staan totdat je het laatste cijfer ook hebt verstuurd. In dit geval draai je tenslotte een 5 en de eindkiezer draait nog vijf stappen, waarna je bent verbonden met 655.

Je moet wel bedenken, dat het aantal eindkiezers alleen wordt bepaald door het aantal *oproepen* voor de nummers 600—699. Wanneer dus in die groep niemand is opgebeld, maar wel b.v. dat nummer 624 zelf opbelt, dan bezet hij *daarvoor* geen eindkiezer in zijn groep, maar een eindkiezer in de groep van de abonné die hij wenst te bereiken. Het aantal eindkiezers per groep wordt dus bepaald door de mate waarin de nummers in die groep worden opgebeld, en men zal ook hier rekening houden met een behoorlijke menging van abonné's die vaak en die weinig worden opgeroepen. Een typisch voorbeeld van abonné's die vaak worden opgeroepen, is een taxibedrijf of een bioscoop.

Aan de uitgangen van de drie in fig. 120 getekende groepen-

HOOFDSTUK X

Huisinstallaties: Verdeling van huisinstallaties in groepen - beveiliging van leidingen en verbruiksmeter - aarding van de leiding - schakeling der smeltpatronen en schakelaars - serie- en hotelschakelaars - aftakdozen - Rubli-dozen - beveiliging tegen electrische schokken - krachtaansluitingen - automatische apparaten (boilers, koelkasten, enz.) met spertijden - dubbeltariefmeters - schakelklokken.

Wij hebben reeds gezien hoe in normale gevallen een huisinstallatie gevoed wordt door middel van een der drie fasen van de draaistroomkabel, welke de electrische energie onder een spanning van 220/380 volt in een stad verdeelt. De spanning voor huisverlichting bedraagt in dat geval dus 220 V.

Met behulp van een stuk grondkabel wordt de energie gevoerd naar een kastje, waarin zich een smeltveiligheid bevindt van b.v. 15 A. Dit kastje is verzegeld, zodat het de verbruiker onmogelijk is een smeltveiligheid voor grotere stroomsterkte in te schakelen. Een en ander dient dan ook ter beveiliging van de kabel en van de verbruiksmeter.

Na deze smeltveiligheid komt de verbruiksmeter, waarvan we de schakelingen gegeven hebben in het hoofdstuk over meetinstrumenten, zowel voor het geval wij te maken hebben met een éénfasemeter als met een draaistroommeter. Dit laatste komt niet alleen voor, wanneer krachtwerktuigen in de woning worden gebruikt (of grote verwarmingsapparaten, zoals electrische haarden) maar ook bij grotere verlichtingsinstallaties van grote woningen. In de meeste gevallen treft men dus een normale éénfasemeter aan.

Tot en met de meter is het onderhoud van de installatie voor rekening van het electrisch bedrijf; de gehele installatie daarachter dient echter op kosten van de verbruiker te worden onderhouden. Het bedrijf mag echter wel bepalingen maken, waaraan de installatie als geheel terwille van de veiligheid dient te voldoen. Na de meter wordt de installatie verdeeld in een aantal groepen, die beveiligd zijn met smeltpatronen, die natuurlijk een lagere smeltwaarde moeten hebben dan die van het bedrijf. Men neme dus voor dit geval geen smeltveiligheden van 15 A, maar b.v. van 10.

Indien kortsluiting ontstaat, zal een der smeltveiligheden van

kleinere centrales gemaakt, die men knooppuntscentrales noemt omdat zij knooppunten in het net vormen. Zo is b.v. Hilversum een knooppuntscentrale van Amsterdam. De knooppuntscentrales hebben netnummers, waarvan alleen het laatste cijfer een nul is. Nu Amsterdam dus 0 2900 heeft, hebben de knooppuntscentrales van dit district de netnummers 0 2910, 0 2920, enz. tot en met 0 2990; Hilversum bijv. 0 2950. Aan een knooppuntscentrale kunnen weer ten hoogste tien eindcentrales worden verbonden met netnummers eindigende met 1 t/m 9. Zo is Baarn (0 2954) een eindcentrale van de knooppuntscentrale Hilversum. De knooppuntscentrales behoeven niet regelmatig rond om de districtscentrale te liggen; hun ligging is geheel afhankelijk van de bevolkingsdichtheid, dus van het aantal aansluitingen. Haarlem (0 2500) ligt toch dichter bij Amsterdam dan Hilversum, maar aan het netnummer is al te zien, dat Haarlem een districtscentrale is.

Een moeilijk probleem in de automatische telefonie is dat van de gesprekkentelling, vooral wanneer het gaat om automatisch interlocaal verkeer. Hierbij moeten de gesprekkosten worden uitgedrukt in eenheden, die gelijk zijn aan een stadsgesprek. Maar in tegenstelling tot de telling van de normale locale gesprekken is bij interlocaal verkeer de telling afhankelijk van de afstand (zônes) en van de gesprekduur (per drie minuten).

opgeroepen nummer om een of andere reden niet bereikbaar is). Inlichtingen kan men dan bij de inlichtingendienst van de telefooncentrale verkrijgen. Je hebt nog toontjes voor het aangeven van de drie minuten-grens bij interlocale gesprekken, enz. Als je veel telefoneert, zal het je opvallen, dat de verschillende wektonen in Rotterdam, Amsterdam en andere steden niet gelijk zijn. Het tempo waarin deze gegeven worden, is echter wel gelijk, opdat het publiek onmiddellijk begrijpt wat de bedoeling is.

Een van de vele eigenaardige schakelingen, die in een telefooncentrale voorkomen is de zgn. vangschakeling. Het doel is wel zeer buitengewoon, maar het blijkt noodzakelijk te zijn. De schakeling dient nl. voor het opsporen van kwaadwillige oproepen. Stel, dat je iemand wilt plagen door hem steeds maar weer op te bellen en dan geen antwoord te geven als hij aan de telefoon komt. Zodra je de hoorn weer op de haak legt, zullen alle kiezers naar hun ruststand terugdraaien en vallen de relais af, zodat dan niet meer is na te gaan wie de geplaagde abonné heeft opgebeld. Met behulp van een speciale schakeling nu is het mogelijk een willekeurig circuit na het tot stand komen van een verbinding te blokkeren, tenminste wanneer het circuit een oproep geeft voor een bepaalde abonné, die zich beklaagd heeft over kwaadwillige oproepen! Nadat dan de verbinding geblokkeerd is en de kiezers blijven staan is het voor het personeel van de centrale een kleine kunst de oproepende abonné op te sporen. Deze is dus door de vangschakeling als het ware gevangen!

Interlocale telefonie.

Bij de interlocale telefonie wordt de zaak natuurlijk aanmerkelijk ingewikkelder. In principe verandert er weinig. Je kiest een centrale en nadat je de nieuwe wektoon hebt verkregen kies je het nummer in de centrale, dat je moet hebben. Maar door de grotere afstanden wordt de practijk van een en ander vrij lastig. In Nederland is het interlocale net stervormig, hoewel dit geenszins de enige methode is om een net op te bouwen. Men heeft nu enige zgn. districtscentrales. Dit zijn de grote centrales van een district en hun netnummers zijn te herkennen aan de laatste twee cijfers : 00 (Amsterdam K 2900 of 0 2900). Rondom de districtscentrales heeft men

twee voedingsdraden, daar de nuldraad er niet in voorkomt. Voor een dergelijk stopcontact zou het dus nodig zijn, dat vanaf de T-doos alsnog een (derde) draad wordt getrokken, die in de doos is verbonden met de nuldraad.

Een andere mogelijkheid is, dat beide voedingsdraden niet in de T-doos eindigen, maar meteen doorlopen (een naar de lamp, nl. de nuldraad, en de andere naar de schakelaar, de fasedraad). In dat geval is in de T-doos geen enkele verbinding nodig en een extra nuldraad voor een stopcontact bij de schakelaar zou je via de T-doos moeten gaan halen, hetzij bij de lamp, hetzij bij de dichtstbijzijnde verbinding van de voedingsleiding, indien dit korter is. Er komen dan drie draden in de buis, die meestal 3/8" is, waardoor maximaal vier draden mogen worden getrokken.

De zgn. Rubli-dozen hebben het voordeel, dat zij gemakkelijk bereikbaar zijn. Zij zijn geplaatst daar waar de lamp komt te hangen. Men kan er de lamp dan ook áán hangen. Vanuit zo'n doos gaan voedingsleidingen weg voor volgende lichtpunten, alsmede een buis met leiding voor de schakelaar. Zij zijn groot genoeg voor het onderbrengen van de nodige lassen, terwijl zij voldoende uitgangen hebben voor aan- en afvoerleidingen. Naast het grote voordeel, dat zij gemakkelijk bereikbaar zijn, hebben zij het nadeel, dat in het algemeen meer buis en leidingen moeten worden geplaatst. Zij zijn dus duurder in het gebruik.

De plaats van stopcontacten mag niet zo maar willekeurig zijn. Vooral wanneer het gaat om het aanbrengen van een stopcontact in een bewoond huis, waarbij men enerzijds de muren niet wil beschadigen, terwijl men anderzijds zo weinig mogelijk wil zien van de buizen, verdient het aanbeveling de stopcontacten laag bij de grond aan te brengen. Men kan dan altijd, komende van een voedingspunt in een doos, met een kort stuk van de buis boven de vloer uitsteken. Ook bij nieuwbouw verdient het aanbeveling de stopcontacten niet hoog aan te brengen, daar het een minder fraai gezicht is voor de muren de snoeren te zien hangen.

Wel moet men er voor zorgen dat kinderen geen metalen voorwerpen in de stopcontacten steken, daar zij een gevaarlijke schok zouden kunnen oplopen. De gaten van een stopcontact hebben wat dat betreft blijkbaar grote aantrekkingskracht op kleine kinderen.

draden trekken, al zouden met enig wringen nog wel een of twee méér kunnen worden toegevoegd. De afstanden van punt tot punt zijn meestal niet zo groot, dat het trekken van draden enig bezwaar vormt.

Nemen we het geval van een verlichtingsornament (lamp) met een enkelvoudige schakelaar: de lamp hangt aan het plafond en wordt gevoed door middel van een leiding welke reeds tot onder de vloer van de bovenverdieping is gestegen. Ergens boven het plafond, op een plaats waar gemakkelijk een luik in de vloer van de verdieping erboven kon worden aangebracht, is een doos aangebracht, zo, dat met zo min mogelijk lengte aan leidingen kan worden volstaan. Deze doos kan een zgn. T-doos zijn, d.w.z. de (ronde) doos heeft drie uitgangen. Eén hiervan dient voor de verbinding met de buis van de voedingsleiding, de tweede loopt over in een leiding, die naar de plaats van de lamp gaat en de derde dient voor een leiding, die naar de schakelaar in de betrokken kamer loopt. Deze laatste leiding gaat dus boven het plafond langs de kortst mogelijke weg totdat zij naar beneden kan lopen in een muur tot op de goede hoogte voor de schakelaar.

Aangenomen, dat de voedingsleiding reeds is aangebracht en dus twee draden, een fasedraad en een nuldraad, in de doos bereikbaar zijn, dan wordt de installatie als volgt afgewerkt. Met de spiraal trekt men vanuit de T-doos een draad door de buis naar de lamp en een draad door de buis naar de schakelaar. Voorts wordt een draad getrokken van de schakelaar over de T-doos naar de lamp. Zowel op de plaats waar de schakelaar komt als waar de lamp komt te hangen, heeft men dan twee draden. Verbind je nu beide einden in de T-doos met de twee draden van de voedingsleiding, dan is het doel bereikt: de lamp kan door middel van de schakelaar in- en uitgeschakeld worden. De verbindingen in de T-doos worden tot stand gebracht door middel van zgn. lasdoppen, die men eenvoudig om de in elkaar gedraaide draden, die moeten worden verbonden, draait. Bij dit alles moet worden gezorgd dat de schakelaar in de fasedraad wordt geschakeld, daar dit voorschrift is.

Indien nu onder de schakelaar een stopcontact (deze heten officieel wandcontactdozen) moet worden geplaatst, dan moet je natuurlijk wel bedenken, dat je in de schakelaar niet beschikt over

10 A doorsmelten, maar de 15 A-patroon van het bedrijf blijft heel. Worden echter op twee verschillende groepen apparaten geschakeld, die beide 9 A verbruiken, zodat totaal 18 A stroom uit het net wordt getrokken, dan zal na korte tijd de 15 A-patroon wèl doorsmelten!

Zoals bekend is een der twee draden van het huisnet geaard en verbonden met de nulleider van het draaistroomnet. In de geaarde draad mogen nooit smeltveiligheden worden opgenomen, daar dit bij doorsmelten onder sommige omstandigheden gevaar kan opleveren. De smeltveiligheden der verschillende groepen zijn dus steeds in de fasedraad opgenomen.

Schakelaars voor verlichtingsornamenten moeten steeds in de fasedraad opgenomen worden, zodat bij uitschakelen het ornament werkelijk spanningsvrij wordt.

De leidingen, die vast verbonden zijn met de woning, hetzij langs de wanden en plafonds, hetzij boven het plafond of in de muren moeten in buis gemonteerd worden. Bij aftakkingen van buizen worden speciale dozen gebruikt. Deze dozen zijn meestal boven het plafond aangebracht en bereikbaar door de vloer van de verdieping erboven te openen. Daartoe moeten natuurlijk in de vloeren ter plaatse van de dozen luikjes worden aangebracht, die kunnen bestaan uit een tweetal korte planken, in tegenstelling tot de normale planken, die veel langer zijn en die het openen van de vloer zouden bemoeilijken.

Moeten nieuwe buizen in een bestaande woning worden aangebracht, dan moet men de muren openhakken, indien men er tenminste prijs op stelt, dat de buizen weggewerkt zijn. Meestal zijn de buizen echter bij de bouw van de woning in voldoende mate aangebracht, terwijl zij wel zo duurzaam zijn, dat zij niet behoeven te worden vernieuwd.

Iets anders is het met de draden, welke in de buizen zijn geplaatst. Deze moeten ongetwijfeld na enkele tientallen jaren door nieuwe worden vervangen. Dit kan geschieden door ze in de buizen te trekken. Met behulp van een spiraal, die men in de buis kan drukken en die door zijn vering in staat is vele bochten te nemen, kan men draden in de buizen trekken, door deze aan het ene uiteinde van de in de buis getrokken spiraal vast te maken. In een buis van een bepaalde diameter mag men tot een maximum aantal

ken aan. Bij het overschakelen van het ene op het andere tarief wordt een tandwiel omgezet, zodat het andere telwerk wordt aangedreven. Ook 's nachts kan in zo'n geval goedkoper worden geleverd, zodat men van de nacht gebruik kan maken voor het verwarmen van water. Daartoe bestaan boilers, die betrekkelijk weinig vermogen opnemen en gedurende de nacht een flinke hoeveelheid water op hoge temperatuur brengen. Zij zijn voorzien van een warmte-isolerende laag, zodat het water gedurende de gehele dag gebruikt kan worden. Doordat het lage tarief 's nachts geldt, krijgt men op goedkope wijze warm water.

Voor het omschakelen van een dubbeltariefmeter, dat geschiedt met behulp van electromagneetjes, dient een spanning aan een paar klemmen van de meter te worden toegevoerd. Het inschakelen van die spanning gebeurt meestal door middel van een zgn. schakelklok, die bij de meter is gemonteerd. Natuurlijk is behalve de meter zelf ook deze klok verzegeld om te voorkomen, dat men de tijdinstelling van de klok in zijn voordeel zou veranderen! Het bezwaar van schakelklokken is dat zij kostbaar zijn, terwijl bij het afvallen van de spanning gedurende een bepaalde tijd de klokken na het weer inschakelen van de spanning achterlopen. Zij schakelen dan niet meer op het juiste ogenblik in en uit, hetgeen soms klachten oplevert van de verbruiker, die daar geen rekening mee heeft gehouden en zijn apparaten (kooktoestellen b.v.) wel op de juiste tijd gebruikt, maar toch het dure tarief moet betalen.

Een ander systeem bestaat dan ook uit het centraal omschakelen van de dubbeltariefmeters vanuit een centraal punt. De schakelklokken komen daardoor te vervallen, terwijl de centrale schakelklok natuurlijk gemakkelijk na een storing weer op tijd kan worden gesteld. Het grote nadeel is echter, dat hiervoor extra leidingen nodig zijn, hetgeen veel kosten met zich brengt. Daardoor treft men de plaatselijke schakelklok meestal aan.

Een goede beveiliging geven de in de handel zijnde klepjes, plaatjes isolatiestof, voorzien van twee pennen, die men in het stopcontact steekt. Er zijn nu twee gaten, waarin men de steker van een snoer kan insteken, maar niet voordat men een draaiend isolatieplaatje, dat ook twee gaten heeft, in een zodanige stand heeft gebracht, dat de gaten twee aan twee voor elkaar staan. Bij het uittrekken van de steker zal het draaiend plaatje onmiddellijk onder invloed van een veer verdraaien, zodat een kind niet meer de contacten van het stopcontact kan bereiken.

Een bijzondere schakeling is de zgn. hotelschakeling, zo genoemd omdat ze vaak in hotelkamers voor het eerst werd toegepast. Het gaat erom een lamp op twee plaatsen onafhankelijk van elkaar te kunnen bedienen. Zo kan men verlangen, dat de kamerlamp zowel

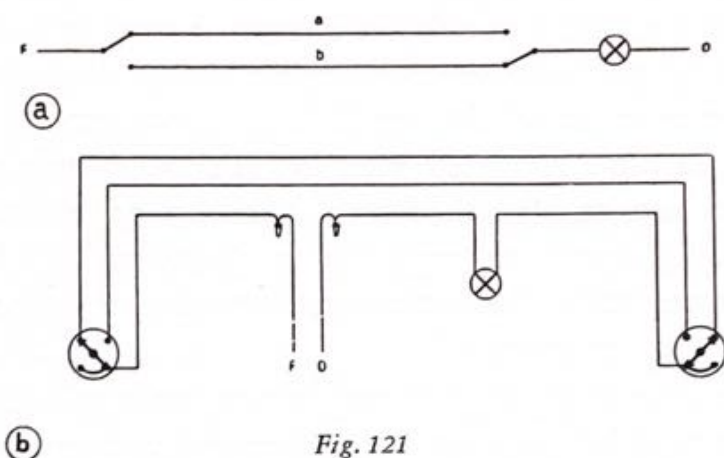


Fig. 121

met een schakelaar bij de deur als met een trektouw vanuit het bed aan- en uitgedraaid kan worden. De schakeling van fig. 121 kan daarvoor worden gebruikt, waarvan in fig. 121a het principeschema is weergegeven. De draden a en b worden de wisseldraden genoemd. In fig. 121b is de loop der draden in de buizen getekend.

Vaak komt men de dubbeltariefmeters tegen. Gedurende bepaalde uren van de dag levert het electriciteitsbedrijf electrische energie tegen een aanmerkelijk lager tarief dan het normale. Dit zijn dan de uren, dat de centrale aanmerkelijk minder belast is. De dubbeltariefmeter heeft twee telwerken en de ferrarisschijf drijft een der telwer-